



DISERTASI TE 093099

SISTEM KENDALI DAYA MAKSIMUM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN VERY SPARSE MATRIX CONVERTER BERBASIS KECERDASAN BUATAN

Muldi Yuhendri
2210 301 013

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.
Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.

PROGRAM DOKTOR
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

Lembar Pengesahan Disertasi

SISTEM KENDALI DAYA MAKSIMUM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN VERY SPARSE MATRIX CONVERTER BERBASIS KECERDASAN BUATAN

Disusun oleh :

Muldi Yuhendri

NRP. 2210301013

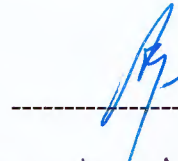
Disertasi ini telah diuji pada tanggal 19 Desember 2016 dan disetujui oleh :

1. Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.
NIP. 1965 10 12 1990 03 1003



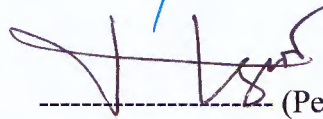
----- (Pembimbing I)

2. Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.
NIP. 1958 09 16 1986 01 1001



----- (Pembimbing II)

3. Ir. Hanny Hosiana Tumbelaka, M.Sc., Ph.D.
NIP. 89-004



----- (Penguji I)

4. Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
NIP. 1973 09 27 1998 03 1004



----- (Penguji II)

5. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 1980 06 03 2006 04 1003



----- (Penguji III)



Mengetahui,

Direktur Pascasarjana,

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 1960 12 02 1987 01 1001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Dengan ini Saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan disertasi saya dengan judul :

SISTEM KENDALI DAYA MAKSIMUM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN VERY SPARSE MATRIX CONVERTER BERBASIS KECERDASAN BUATAN

adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang Saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017



Muldi Yuhendri
NRP. 2210301013

SISTEM KENDALI DAYA MAKSIMUM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGGUNAKAN VERY SPARSE MATRIX CONVERTER BERBASIS KECERDASAN BUATAN

Nama Mahasiswa : Muldi Yuhendri
NRP : 2210 301 013
Pembimbing : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.
Co-Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.

ABSTRAK

Pembangkit listrik tenaga angin kurang berkembang di Indonesia, karena kondisi kecepatan angin yang rendah serta kurang ekonomis dibandingkan sumber energi lain. Untuk meningkatkan peran pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia perlu dilakukan pengembangan untuk meningkatkan performansi pembangkit. Dalam disertasi ini diusulkan sebuah metode untuk meningkatkan performansi pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan generator tipe *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG).

Peningkatan performansi pembangkit listrik tenaga angin dirancang untuk meningkatkan kualitas daya dan efisiensi pembangkit. Peningkatan kualitas daya dilakukan dengan memilih konverter daya jenis *Very Sparse Matrix Converter* (VSMC). Konverter ini dipilih karena memiliki keuntungan antara lain tidak menggunakan dc link, dapat menghasilkan gelombang tegangan sinusoidal pada sisi grid dan lebih ekonomis karena jumlah switch aktifnya lebih sedikit dibandingkan matrix konverter lain. Peningkatan efisiensi dirancang dengan mengembangkan sistem kendali daya maksimum atau disebut juga *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), yang terdiri dari kontroller kecepatan dan algoritma MPPT.

Penelitian ini memberikan dua kontribusi, yaitu desain kontroller kecepatan PMSG menggunakan *Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control* (AFSMOC) dan desain algoritma MPPT menggunakan metode multiclass *Least Squares Support Vector Machine* (LS-SVM). Metode AFSMOC dirancang untuk meningkatkan ketahanan *Sliding Mode Control* (SMC) dalam mengendalikan kecepatan PMSG dengan membuat penguat adaptif pada sliding surface menggunakan *Type-2 Fuzzy System* (T2FS).

Algoritma MPPT dengan metode LS-SVM dirancang untuk mencari kecepatan referensi pada titik daya maksimum berdasarkan perubahan daya output generator. Kinerja algoritma MPPT ditentukan oleh ukuran step. Algoritma LS-SVM didesain untuk mendapatkan ukuran step yang bervariasi, sehingga dapat mempercepat respon mencapai titik maksimum serta dapat meminimalisir riak kecepatan pada titik maksimum. Algoritma LS-SVM dipilih menggunakan metode RBF kernel dengan encode *One vs One* dan decode *hamming distance*. Metode ini dipilih karena lebih akurat dengan overall accuracy 97.19%.

Model pembangkit listrik tenaga angin yang diusulkan menggunakan PMSG 2.5 kW yang terhubung dengan grid 380/220 Volt 50 Hz. Generator digerakan oleh turbin angin horizontal tanpa gearbox dengan jari-jari 2 m dengan koefisien daya maksimum 0.53125 dan *Tip Speed Ratio* (TSR) optimum 8.09. Model disimulasikan dengan kecepatan angin yang bervariasi melalui simulink dan interface *National Intrument Data Acquisition* (NIDAQ) USB 6211.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa model yang diusulkan memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan metode lain. Penggunaan LS-SVM untuk algoritma MPPT telah mampu mereduksi error maksimum koefisien daya dari 1.46% pada algoritma PO menjadi 0.047%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan LS-SVM telah dapat meningkatkan daya output generator. Penggunaan AFSMOC juga telah mampu meningkatkan ketahanan controller kecepatan menghadapi gangguan eksternal. Error maksimum kecepatan dapat direduksi dari 1.27% pada SMC menjadi 0.14% pada kondisi transien. Penggunaan VSMC juga telah dapat meningkatkan kualitas daya pembangkit dengan arus dan tegangan sinusoidal pada grid.

Kata kunci : *Pembangkit listrik tenaga angin, MPPT, VSMC, LSSVM, AFSMOC*

MAXIMUM POWER CONTROL SYSTEM OF WIND POWER PLANT USING VERY SPARSE MATRIX CONVERTER BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENT

Name : Muldi Yuhendri
Student Identity Number : 2210 301 013
Supervisor : Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.
Co-Supervisor : Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng.

ABSTRACT

Wind power generation system is underdeveloped in Indonesia, due to low wind speed conditions and and less economical than other energy sources. To enhance the role of wind power generation system in Indonesia, the development is necessary to improve its performance. This dissertation proposes a method to increase the performance of grid connected-wind power generation system that use Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG).

Improved performance of wind power generation system is designed to improve the power quality and efficiency. The improvement of power quality is done by choosing Very Sparse Matrix Converter (VSMC) as power converter. This converter is chosen due many advantages such as not using dc-link storage, can produce sinusoidal voltage at grid side and more economical because the number of switches less than other matrix converters. The improvement of efficiency is designed by develop the maximum power control or also known as Maximum Power Point Tracking (MPPT), consisting of the speed control and the MPPT algorithm.

This research study provides two contributions, namely design of the PMSG speed control using Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control (AFSMOC) method and the design of the MPPT algorithm using multiclass Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM) method. The AFSMOC is designed to improve the robustness of Sliding Mode Control (SMC) by creating the adaptive gain in sliding using Type-2 Fuzzy System (T2FS).

MPPT algorithm based on LS-SVM method is designed to tracking the reference speed at maximum power point based on the output power of generator. The performance of MPPT algorithm is determined by the step size. LS-SVM algorithm is designed to obtain the variable step size, so it can accelerate the response reaches a maximum point and minimize the speed ripple at maximum point. LS-SVM algorithm is chosen using RBF kernel with One vs One encode and hamming distance decode. This method was chosen because it is more accurate with overall accuracy 97.19%.

The proposed model using PMSG 2.5 kW are connected to grid 380/220 Volt 50 Hz. The PMSG driven by horizontal wind turbine with blade radius 2 m, maximum power coefficient 0.53125 and optimum Tip Speed Ratio (TSR) 8.09. The model was simulated with varying wind speeds through simulink and National Instrument Data Acquisition (NIDAQ) USB 6211.

The simulation results show that the proposed model gives better results than other methods. The use of LS-SVM for MPPT algorithm has been able to reduce the maximum error of power coefficient from 1.46% in PO algorithm become 0.047%. This result indicate that the use of LS-SVM has been able to increase the generator output power. The use of AFSMOC also been able to increase the robustness of the speed controller against external disturbances. In transient conditions, the maximum error of speed can be reduce from 1.27% in SMC method becomes 0.14% in AFSMOC method. The use of VSMC has also been able to improve the power quality of system with sinusoidal grid voltage and grid current.

Keyword : *Wind power generation system, MPPT, VSMC, LSSVM, AFSMOC*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji syukur penyusun persembahkan ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya, sehingga disertasi ini dapat diselesaikan. Dalam menyelesaikan studi dan disertasi ini, penyusun banyak mendapatkan bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, untuk itu penyusun mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada :

1. Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D selaku pembimbing dan Prof. Dr. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng selaku Co-pembimbing yang telah membimbing, memotivasi dan mengarahkan penyusun dengan sabar dan bijaksana dalam menyelesaikan studi dan disertasi ini.
2. Ir. Hanny Hosiana Tumbelaka, M.Sc., Ph.D, Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng dan Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D, selaku penguji yang banyak memberikan masukan yang konstruktif untuk kesempurnaan disertasi ini.
3. Pemerintah Indonesia melalui Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi yang telah memberikan bantuan beasiswa BPPS dan hibah penelitian disertasi.
4. Rektor dan civitas akademika Universitas Negeri Padang yang telah memberikan izin untuk menempuh studi S3 di Teknik Elektro ITS.
5. Direktur Program Pascasarjana ITS yang telah memberikan kesempatan belajar di ITS.
6. Kedua orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan semangat, do'a dan dukungan selama studi.
7. Istri dan anak-anak tercinta yang senantiasa sabar memberikan semangat, dukungan dan do'a untuk menyelesaikan studi di ITS.
8. Rekan-rekan mahasiswa di Laboratorium Konversi Energi Teknik Elektro ITS yang tidak bisa disebutkan satu per satu atas dukungan dan diskusi yang membangun selama studi.

Pendapat, kritik dan saran yang membangun senantiasa penyusun harapkan untuk kelengkapan disertasi ini.

Surabaya, 5 Januari 2017

Penyusun

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan Disertasi	iii
Pernyataan Keaslian Disertasi	v
Abstrak	vii
Abstract	ix
Kata Pengantar	xi
Daftar Isi	xiii
Daftar Gambar	xvii
Daftar Tabel	xxi
Daftar Singkatan	xxiii
Daftar Simbol	xxv

BAB 1 Pendahuluan

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	7
1.3 Batasan Masalah	7
1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian	8
1.5 Kontribusi Penulisan	8

BAB 2 Tinjauan Sistem Konverter dan Teknik Kendali Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin

2.1 Sistem Konverter Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin	13
2.1.1 Konverter Daya dengan DC Link	14
2.1.2 Konverter Daya tanpa DC Link	15
2.1.2.1 Direct Matrix Converter	16
2.1.2.2 Indirect Matrix Converter	17
2.1.2.3 Very Sparse Matrix Converter	20
2.1.2.4 Super Sparse Matrix Converter	21
2.2 Sistem Kendali Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin	22
2.2.1 Kendali Kecepatan PMSG	24

2.2.1.1 Sensorless Field Oriented Control	26
2.2.2.2 Sensorless FOC Menggunakan VSMC.....	28
2.2.2 Algoritma MPPT	31
2.2.2.1 Algoritma Torka Mekanik Optimum	31
2.2.2.2 Algoritma Pertubasi dan Observasi	32
2.3 Least Squares Support Vector Machine	34
2.3.1 Multiclass Least Squares Support Vector Machine	39
2.4 Fuzzy Type-2 System	42
2.4.1 Fuzzifikasi	42
2.4.2 Rule Base	43
2.4.3 Inferensi Fuzzy	44
2.4.4 Reduksi Tipe	45
2.4.1 Defuzzifikasi	45

BAB 3 Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Very Sparse Matrix Converter

3.1 Model Turbin Angin Sumbu Horizontal	48
3.1.1 Model Turbin Angin	48
3.1.2 Model Drivetrain	49
3.2 Model Permanent Magnet Synchronous Generator	50
3.2.1 Model Elektrik PMSG	50
3.2.2 Model Mekanik PMSG	51
3.3 Model Very Sparse Matrix Converter	52
3.3.1 Struktur Switch VSMC	52
3.3.2 Model Current Source Converter	53
3.3.3 Model Voltage Source Converter	58
3.3.4 Koordinasi Switching CSC dengan VSC	61
3.3.5 Desain Filter LC	66
3.3.6 Rugi daya VSMC	67
3.4 Model Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Very Sparse Matrix Converter	68

4.1	Desain Sistem Kendali Kecepatan PMSG	70
4.1.1	Kontroller Kecepatan PMSG	70
4.1.1.1	Sliding Mode Control	70
4.1.1.2	Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control ..	72
4.1.1.3	Desain Type-2 Fuzzy System	73
4.1.1.4	Validasi Kontroller Kecepatan dengan Fungsi Lyapunov	77
4.1.2	Regulator Arus	78
4.1.3	Model Reference Adaptive System Observer	78
4.2	Algoritma MPPT	80
4.2.1	Algoritma Pertubasi dan Observasi	80
4.2.2	Algoritma Multiclass LS-SVM	82
4.2.2.1	Training Multiclass LS-SVM	85
4.2.2.2	Validasi Model Multiclass LS-SVM	89

5.1 Hasil Simulasi Turbin Angin	92
5.2 Hasil Pemilihan Model LS-SVM untuk Algoritma MPPT	94
5.3 Hasil Simulasi Kontroller Kecepatan dengan AFSMOC	97
5.4. Hasil Simulasi Algoritma MPPT	102
5.5 Performansi VSMC	112
5.6 Hasil Simulasi dengan Nidaq USB 6211	118

6.1 Kesimpulan	123
6.2 Penelitian Selanjutnya	124

4.	Model Pembangkit Listrik Tenaga Angin dan Instalasi Hardware Nidaq 6211	145
5.	Daftar Riwayat Hidup	149

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Kapasitas pembangkit listrik energi terbarukan di Indonesia	1
Gambar 1.2	Skema pembangkit listrik tenaga angin yang terhubung dengan grid	3
Gambar 1.3	Roadmap penelitian	10
Gambar 2.1	Jenis konverter daya pembangkit listrik tenaga angin yang terhubung dengan grid menggunakan PMSG	14
Gambar 2.2	Topologi konverter yang menggunakan DC Link	15
Gambar 2.3	Skema direct matrik konverter pada PMSG	16
Gambar 2.4	Skema indirect matrik konverter pada PMSG	18
Gambar 2.5	Struktur switch CSC indirect matrix converter dan VSMC	20
Gambar 2.6	Skema VSMC untuk pembangkit listrik tenaga angin	21
Gambar 2.7	Skema SSMC untuk pembangkit listrik tenaga angin	22
Gambar 2.8	Kurva daya turbin angin	23
Gambar 2.9	Skema sistem kendali MPPT	23
Gambar 2.10	Skema kendali kecepatan PMSG dengan metode DTC ...	24
Gambar 2.11	Skema kendali kecepatan PMSG dengan metode FOC	25
Gambar 2.12	Skema sensorless FOC	26
Gambar 2.13	Estimator dan controller kecepatan dari metode sensorless FOC	27
Gambar 2.14	Sensorless FOC menggunakan VSMC	29
Gambar 2.15	Skema sensorless FOC menggunakan VSMC yang diusulkan	30
Gambar 2.16	Karakteristik torka mekanik turbin angin	31
Gambar 2.17	Prinsip kerja algoritma PO	33
Gambar 2.18	Struktur SVM	34
Gambar 2.19	Struktur Type-2 Fuzzy System	42
Gambar 2.20	Fungsi keanggotaan Type-2 Fuzzy System bentuk segitiga .	43
Gambar 2.21	Inferensi T2FS dengan operasi meet	44
Gambar 3.1	Skema pembangkit listrik tenaga angin menggunakan VSMC	47

Gambar 3.2	Drivetrain turbin angin	49
Gambar 3.3	Model turbin angin dan drivetrain	49
Gambar 3.4	Model PMSG	51
Gambar 3.5	Struktur VSMC	52
Gambar 3.6	Skema CSC sebagai penyearah sumber arus stand alone ..	53
Gambar 3.7	Arus input CSC	55
Gambar 3.8	Vektor arus input dan status switch pada setiap sektor	56
Gambar 3.9	Voltage source converter stand alone	58
Gambar 3.10	Vektor tegangan output	60
Gambar 3.11	Koordinasi switch CSC dan VSC pada sektor 1	62
Gambar 3.12	Pulsa carrier	63
Gambar 3.13	Model VSMC	66
Gambar 3.14	Model Pembangkit listrik tenaga angin menggunakan VSMC	68
Gambar 4.1	Skema sistem kendali MPPT	69
Gambar 4.2	Struktur sliding mode control	71
Gambar 4.3	Struktur AFSMOC	72
Gambar 4.4	Fungsi keanggotaan T2FS	74
Gambar 4.5	Diagram alir algoritma Karnik-Mendel	76
Gambar 4.6	MRAS observer berdasarkan model arus stator	79
Gambar 4.7	Diagram alir algoritma MPPT menggunakan algoritma PO ..	81
Gambar 4.8	Diagram alir algoritma MPPT dengan metode LS-SVM ..	82
Gambar 4.9	Skema penentuan ukuran step dengan LS-SVM	83
Gambar 4.10	Blok LS-SVM	83
Gambar 4.11	Diagram alir training LS-SVM	86
Gambar 5.1	Karakteristik turbin angin	93
Gambar 5.2	Data training LS-SVM	94
Gambar 5.3	Output hasil training LS-SVM	95
Gambar 5.4	Akurasi multiclass LS-SVM	97
Gambar 5.5	Hasil simulasi kontroler kecepatan PMSG	98
Gambar 5.6	Output kontroler kecepatan PMSG	100
Gambar 5.7	Performansi MRAS observer	101

Gambar 5.8	Ukuran step algoritma MPPT	102
Gambar 5.9	Output algoritma MPPT	103
Gambar 5.10	Kecepatan rotor PMSG.....	105
Gambar 5.11	Performansi sistem kendali MPPT pada sisi turbin angin	107
Gambar 5.12	Daya pembangkit listrik tenaga angin	109
Gambar 5.13	Performansi daya pembangkit listrik tenaga angin.....	111
Gambar 5.14	Tegangan grid	113
Gambar 5.15	Performansi arus VSMC	114
Gambar 5.16	THD arus grid dan arus konverter	115
Gambar 5.17	Performansi tegangan dc VSMC	116
Gambar 5.18	Pulsa modulasi VSMC untuk sektor 1	117
Gambar 5.19	Skema simulasi model dengan NIDAQ 6211	118
Gambar 5.20	Hasil simulasi dengan Nidaq USB 6211	119
Gambar 5.21	Performansi sistem kendali MPPT dengan Nidaq USB 6211	121

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Penelusuran publikasi dan konstribusi	11
Tabel 3.1	Status switching CSC	54
Tabel 3.2	Switch yang aktif pada setiap sektor	57
Tabel 3.3	Status switch dan tegangan output VSC	59
Tabel 4.1	Rule base T2FS	75
Tabel 4.2	Kelas data output LS-SVM	85
Tabel 5.1	Parameter simulasi	91

DAFTAR SINGKATAN

AFSMOC	: Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control
ANFIS	: Adaptive Fuzzy Inference System
COS	: Center of Centroid
CSC	: Current Source Converter
DC	: Direct Current
DRI	: Dioda Rectifier – Inverter
DTC	: Direct Torque Control
EMR	: Empirical Risk Minimization
FLC	: Fuzzy Logic Controller
FOC	: Field Oriented Control
FOU	: Footprint of Uncertainty
GW	: Giga Watt
HCC-SVM	: Hysterisis Current Control – Space Vector Modulation
KKT	: Karush Kuhn Tucker
kW	: Kilo Watt
LMF	: Lower Membership Function
LS-SVM	: Least Squares Support Vector Machine
MISO	: Multi Input Single Output
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
MRAS	: Model Reference Adaptive System
NI DAQ	: National Instrumen Data Acquisition
PI	: Propotional - Integral
PMSG	: Permanent Magnet Synchronous Generator
PO	: Pertubasi dan Observasi
PUSDATIN ESDM	: Pusat Data dan Informasi Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral
PWM	: Pulse Width Modulation
RBF	: Radial Basis Function

SMC	: Sliding Mode Control
SRM	: Structural Risk Minimization
SSMC	: Super Sparse Matrix Converter
SVM	: Support Vector Machine
SVPWM	: Space Vector Pulse Width Modulation
T1FS	: Type-1 Fuzzy System
T2FS	: Type-2 Fuzzy System
TSR	: Tip Speed Ratio
UMF	: Upper Membership Function
VC	: Vapnik Chervokinensis
VSC	: Voltage Source Converter
VSMC	: Very Sparse Matrix Converter

DAFTAR SIMBOL

A	: Luas area tangkan sudu turbin angin
B	: Koefisien friksi generator
b	: Bias pada LS-SVM
c	: Parameter regulasi LS-SVM
$c_1 - c_6$: Konstanta turbin angin
C_p	: Koefisien daya
C_{p_max}	: Koefisien daya maksimum
$d_{\alpha i}, d_{\beta i}$: Duty cycle switch CSC
$d_{\alpha o}, d_{\beta o}$: Duty cycle switch VSC
e	: Error LS-SVM
e_ω	: Error kecepatan generator
f_c	: Frekuensi switching VSMC
G_s	: Penguat sliding surface AFSMOC
$g(x_i)$: Fungsi transformasi LS-SVM
I_i	: Vektor arus grid
i_A, i_B, i_C	: Arus grid dalam sistem tiga fasa
i_α, i_β	: Arus grid dalam sumbu $\alpha\beta$
i_d, i_q	: Arus stator dalam sumbu dq
I_m	: Magnitudo arus grid
J	: Momen inersia generator
J_w	: Momen inersia turbin angin
K_t	: Gangguan sistem pada sliding mode control
K_d dan K_q	: Penguat sliding surface arus stator
K_e	: Penguat error pada sliding mode control
K_u dan K_v	: Penguat input T2FS
K_s	: Penguat sliding surface pada sliding mode control
K_p, K_i	: Penguat pada MRAS observer
$K(x, x_i)$: Fungsi kernel
L_d, L_q	: Induktansi stator dalam sumbu dq
m_i	: Indeks modulasi CSC
m_o	: Indeks modulasi VSC
n_p	: Jumlah pasang kutub generator
P_m	: Daya mekanik turbin angin
P_{m_max}	: Daya mekanik maksimum

P_w	: Daya angin
P_o	: Daya output generator
R	: Jari-jari turbin angin
R_s	: Resistansi stator
S	: Sliding surface kontroller kecepatan
S_d dan S_q	: Sliding surface arus stator
T_c	: Perioda switching CSC
T_v	: Perioda switching VSC
T_e	: Torka elektromagnetik generator
T_m	: Torka mekanik pada poros kecepatan rendah
T_{opt}	: Torka mekanik optimum
T_{shaft}	: Torka mekanik pada poros kecepatan tinggi
T_w	: Torka turbin angin
V_{pn}, V_{dc}	: Tegangan searah pada VSMC
V_i	: Vektor tegangan grid
V_{iA}, V_{iB}, V_{iC}	: Tegangan grid dalam sistem tiga fasa
V_o	: Vektor tegangan stator
V_{oa}, V_{ob}, V_{oc}	: Tegangan stator dalam sistem tiga fasa
$V_{\alpha o}, V_{\beta o}$: Tegangan stator dalam sumbu $\alpha\beta$
v_d, v_q	: Tegangan stator dalam sumbu dq
V_{om}	: Magnitudo tegangan stator
v_w	: Kecepatan angin
w	: Pembobot pada LS-SVM
x_i	: Data input T2FS atau LS-SVM
y_l, y_r	: Titik kiri dan kanan output T2FS
Y_{COS}	: Interval Fuzzy Tipe 1
y_i	: Data output T2FS atau LS-SVM
α_i	: Support vector LS-SVM
β	: Sudut pitch turbin
η_{gear}	: Ratio gear turbin angin
ΔP	: Perubahan daya output generator
λ	: Tip speed ratio
$\Delta\omega_m$: Ukuran step algoritma MPPT
ψ_m	: Fluksi magnet permanen
ω_e	: Kecepatan angular

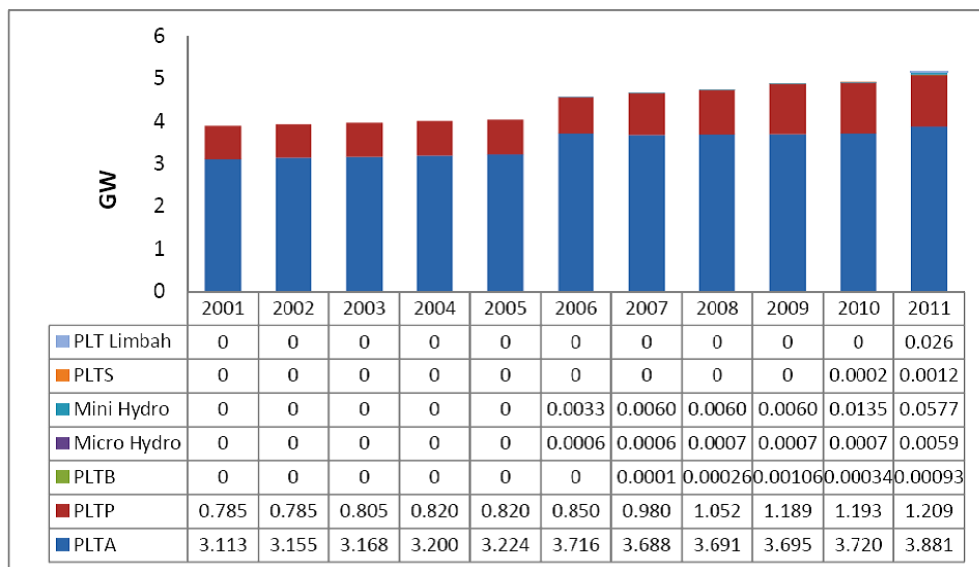
ω_m	: Kecepatan generator
ω_m^*	: Kecepatan referensi generator
ω_w	: Kecepatan putaran pada poros kecepatan tinggi turbin angin
ξ	: Parameter slack SVM
θ_r	: Posisi mekanik rotor
λ_{opt}	: Tip speed ratio optimum
μ	: Fungsi keanggotaan T2FS
$\underline{\mu}_X(x)$: Lower membership function
$\overline{\mu}_X(x)$: Upper membership function
$\left[\underline{f}^l, \overline{f}^l \right]$: Firing strength T2FS

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi pembangkit listrik di Indonesia saat ini masih didominasi oleh energi fosil. Sampai tahun 2011, kapasitas terpasang pembangkit listrik yang menggunakan energi fosil mencapai 34.7 GW (87%) dari total kapasitas pembangkit listrik di Indonesia (Pusdatin ESDM, 2014). Salah satu kelemahan energi fosil ini adalah persediannya semakin berkurang dan tidak dapat diperbaharui. Pemanfaatan sumber energi terbarukan adalah salah satu alternatif untuk menggantikan posisi energi fosil ini. Beberapa sumber energi terbarukan, seperti energi surya, air, panas bumi dan angin telah mulai digunakan untuk pembangkit tenaga listrik, walaupun belum berkembang secara maksimal. Kapasitas terpasang pembangkit listrik energi terbarukan baru mencapai 5.2 GW (13%) pada tahun 2011 (Pusdatin ESDM, 2014). Energi terbarukan yang banyak digunakan untuk pembangkit listrik adalah tenaga air dan panas bumi, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Kapasitas pembangkit listrik energi terbarukan di Indonesia
(PUSDATIN ESDM, 2014)

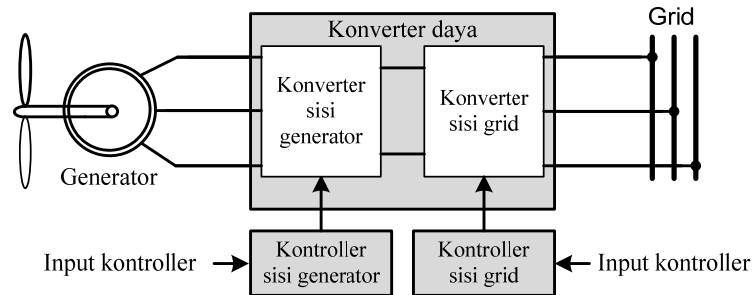
Gambar 1.1. menunjukkan bahwa pembangkit listrik tenaga angin merupakan pembangkit listrik energi terbarukan yang paling sedikit dikembangkan di Indonesia. Sampai tahun 2011, kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga angin baru mencapai 0.00093 GW, sedangkan potensi energi angin di Indonesia mencapai 61.97 GW (Wargadalam, 2014). Salah satu faktor penyebab belum berkembangnya pembangkit listrik tenaga angin secara maksimal adalah karena kondisi kecepatan angin yang rendah (3 – 6 m/dt) dan masih banyaknya sumber energi terbarukan lain yang memiliki nilai ekonomis lebih tinggi dari energi angin.

Untuk meningkatkan peran pembangkit listrik tenaga angin di Indonesia perlu dilakukan pengembangan yang dapat meningkatkan performansi pembangkit. Telah banyak riset yang dilakukan untuk meningkatkan performansi pembangkit listrik tenaga angin, yang mencakup pengembangan mekanik turbin, generator, konverter daya dan sistem kendali pembangkit.

Peningkatan performansi pembangkit listrik tenaga angin yang diusulkan dalam penelitian ini berorientasi kepada peningkatan efisiensi dan kualitas daya pembangkit. Peningkatan efisiensi dirancang dengan mengembangkan sistem kendali daya maksimum atau disebut juga *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), sedangkan peningkatan kualitas daya dilakukan dengan mendesain konverter yang memiliki kualitas daya bagus.

Secara umum ada dua bentuk pembangkit listrik tenaga angin, yaitu *stand alone* dan terhubung dengan grid. Pembangkit listrik tenaga angin yang terhubung dengan grid lebih efisien dibandingkan model *stand alone*, karena tidak membutuhkan penyimpan energi yang dapat meningkatkan rugi daya (Bhavna, 2015). Dalam penelitian ini, pembangkit listrik tenaga angin dirancang dalam bentuk terhubung dengan grid. Gambar 1.2 menunjukkan skema pembangkit listrik tenaga angin yang terhubung dengan grid, yang terdiri dari turbin angin, generator, konverter daya dan kontroller. Jenis turbin angin yang digunakan adalah tipe sumbu horizontal, karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sumbu vertikal (Schubel, 2012). Jenis generator yang dipilih adalah tipe *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), karena memiliki keunggulan antara lain : lebih efisien, ukuran lebih kecil untuk daya yang sama,

tidak membutuhkan eksitasi eksternal, lebih mudah dikendalikan dan dapat menghasilkan tegangan dalam kecepatan rendah, sehingga banyak dipakai untuk turbin angin tanpa gearbox (Lara, 2009).



Gambar 1.2 Skema pembangkit listrik tenaga angin yang terhubung dengan grid

Pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG umumnya menggunakan full konverter untuk menyalurkan daya ke grid. Selain untuk menyalurkan daya ke grid, konverter ini juga berfungsi sebagai pengendali pembangkit pada sisi generator (Baroudi, 2007). Ada dua jenis full konverter yang telah dikembangkan untuk pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG, yaitu konverter yang menggunakan DC link dan konverter tanpa DC link.

Model konverter dengan DC link yang telah diterapkan untuk pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG adalah Dioda Rectifier-Inverter (DRI) (Ahmed, 2010) dan back to back converter (Kim, 2010). Keunggulan konverter ini adalah lebih sederhana, murah dan teknik modulasi lebih mudah, sedangkan kelemahannya adalah memiliki harmonisa yang tinggi dan membutuhkan kapasitor ukuran besar untuk DC link (Melicio, 2011). Untuk mengurangi harmonisa telah dikembangkan multi level back to back converter (Pouresmaeil, 2011). Salah satu kelemahan multi level back to back converter ini adalah masih menggunakan DC link yang membutuhkan kapasitor ukuran besar.

Permasalahan konverter yang menggunakan DC link dapat diminimalisir oleh konverter tanpa DC link. Konverter tanpa DC link yang telah digunakan untuk pembangkit listrik tenaga angin adalah matrix konverter. Selain tidak menggunakan DC link, konverter ini juga dapat menghasilkan kualitas daya yang lebih bagus dibandingkan DRI dan back to back konverter (Yang, 2010).

Ada dua model matrix konverter yang telah digunakan pada PMSG yang terhubung dengan grid, yaitu direct matrix converter dan indirect matrix converter. Direct matrix converter memiliki struktur switch seperti matrik 3×3 , sehingga menggunakan banyak switch dan teknik modulasi menjadi lebih rumit (Wei, 2001). Indirect matrix converter memiliki struktur seperti back to back converter, yang terdiri dari Current Source Converter (CSC) dan Voltage Source Converter (VSC), sehingga teknik modulasinya lebih sederhana seperti back to back converter (Wang, 2009). Salah satu kelemahan indirect matrix converter adalah menggunakan banyak switch aktif, yaitu 18 buah. Hal ini membuat indirect matrix converter tetap lebih mahal dibandingkan back to back converter yang hanya menggunakan 12 switch aktif. Untuk mengurangi jumlah switch aktif, telah dilakukan pengembangan indirect matrix converter yang menghasilkan beberapa model sparse matrix converter dengan jumlah switch aktif yang lebih sedikit dibandingkan indirect matrix converter konvensional (Kolar, 2007; Schafmeister, 2008). Beberapa model sparse matrix converter ini telah diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga angin, seperti Very Sparse Matrix Converter (VSMC) (Aner, 2011) dan Super Sparse Matrix Converter (SSMC) (Yao, 2008).

Keunggulan SSMC adalah lebih murah, karena hanya memiliki 9 switch aktif sedangkan VSMC memiliki 12 switch aktif. Kelemahan SSMC adalah aliran arus hanya satu arah seperti DRI, sehingga tidak dapat dioperasikan dalam model regeneratif dan ripel torka yang dihasilkan lebih besar dibandingkan VSMC (Kolar, 2011). VSMC memiliki keunggulan antara lain : dapat dioperasikan pada empat kuadran switching dan memiliki kualitas daya yang lebih baik dibandingkan back to back converter (Round, 2006). Berdasarkan fitur masing-masing konverter, maka dipilihlah VSMC sebagai konverter daya untuk pembangkit listrik tenaga angin.

Peningkatan efisiensi pembangkit listrik tenaga angin dilakukan dengan mendesain sistem kendali MPPT, sehingga diperoleh daya output maksimum pada setiap variasi kecepatan angin. Secara garis besar, sistem kendali MPPT terdiri dari algoritma MPPT dan sistem kendali kecepatan generator. Algoritma MPPT berfungsi untuk mendapatkan kecepatan referensi pada titik daya maksimum,

sedangkan kontroller kecepatan berfungsi untuk mengendalikan kecepatan generator agar sesuai dengan kecepatan referensi (Nasiri, 2014).

Beberapa model algoritma MPPT yang telah dikembangkan untuk pembangkit listrik tenaga angin antara lain : algoritma torka mekanik optimum, Perturbation and Observation (PO) dan algoritma berbasis kecerdasan buatan (Abdullah, 2012; Nasiri, 2014). Kelemahan algoritma TSR optimum adalah membutuhkan sensor kecepatan angin, sedangkan kelemahan algoritma torka mekanik optimum adalah memerlukan pengujian turbin angin untuk mendapatkan parameter turbin angin. Pada algoritma PO, nilai output ditentukan berdasarkan perubahan daya output generator, sehingga tidak membutuhkan data kecepatan angin dan parameter turbin angin. Hal ini membuat algoritma PO lebih mudah didesain dan banyak digunakan untuk sistem kendali MPPT pada pembangkit listrik tenaga angin (Abdullah, 2012).

Respon algoritma PO ditentukan oleh nilai step. Algoritma PO konvensional memiliki nilai step konstan. Salah satu kelemahan algoritma PO adalah sulitnya menentukan nilai step yang cocok untuk digunakan. Nilai step yang besar akan meningkatkan distorsi kecepatan pada titik daya maksimum, sedangkan nilai step yang kecil akan memperlambat respon algoritma menuju titik maksimum. Untuk mengatasi hal ini, telah dikembangkan algoritma PO dengan nilai step yang bervariasi, seperti algoritma MMPT berbasis Fuzzy Logic Controller (Yuhendri, 2011a), Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (Menharrar, 2011), Wilcoxon Radial Basis Function Network (Lin, 2010) dan Radial Basis Function Neural Network (Lee, 2011).

Sistem kendali kecepatan generator untuk MPPT banyak dikembangkan dengan metode kontrol vektor, yang mencakup Field Oriented Control (FOC) dan Direct Torque Control (DTC) (Shuhui, 2012). Metode FOC lebih kompleks dibandingkan DTC, tetapi FOC dapat menghasilkan ripple torka yang lebih kecil dibandingkan DTC (Jain, 2010). Berdasarkan keunggulan ini, maka dipilihlah metode FOC untuk sistem kendali kecepatan generator.

Kendali kecepatan PMSG dengan metode FOC dapat dirancang dalam beberapa skema, yaitu sudut torka konstan, unity power factor, fluksi stator konstan atau maksimum torka per Ampere (Vas, 1998). Metode yang banyak

digunakan adalah metode sudut torka konstan, karena lebih sederhana. Dalam metode ini, kecepatan generator hanya dikendalikan melalui arus stator sumbu q . Kendali arus stator sumbu q ini telah dikembangkan dengan beberapa metode, seperti Proportional Integral (PI) controller (Aner, 2011), sliding mode control (Mahersi, 2013) dan beberapa metode berbasis kecerdasan buatan, seperti FLC (Eltamaly, 2013) dan Neural Network (Chen, 2012; Hong, 2014).

Untuk meningkatkan nilai ekonomis sistem kendali, dewasa ini juga telah dikembangkan metode sensorless FOC. Dalam metode ini, sensor kecepatan diganti dengan observer kecepatan, sehingga dapat menurunkan biaya pembuatan sistem kendali (Zhao, 2013). Beberapa metode observer yang telah dikembangkan antara lain Model Reference Adaptive System (MRAS) observer (Brahmi, 2009), Phase Locked Loop (Tong, 2013), Sliding Mode Observer (Senjyu, 2007), Kalman Filter (Rigatos, 2014) dan observer berbasis kecerdasan buatan dengan menggunakan Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (Sing, 2011).

Penelitian ini difokuskan untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas daya pembangkit listrik tenaga angin. Peningkatan kualitas daya didesain dengan menggunakan VSMC yang tidak menggunakan DC link serta dapat menghasilkan kualitas daya yang lebih baik dibandingkan konverter lain. Peningkatan efisiensi dirancang dengan mengembangkan sistem kendali MPPT berbasis sensorless FOC, yang mencakup pengembangan algoritma MPPT dan sistem kendali kecepatan generator. Algoritma MPPT didesain dengan mengembangkan algoritma PO konvensional menggunakan multiclass Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM). Multiclass LS-SVM digunakan untuk mendapatkan nilai step yang bervariasi pada algoritma PO, sehingga diharapkan dapat mempercepat respon mencapai titik daya maksimum serta mengurangi ripple pada titik daya maksimum. Kendali kecepatan generator dikembangkan dengan metode Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control (AFSMOC). Metode ini merupakan gabungan dari Type-2 Fuzzy System (T2FS) dan sliding mode control. T2FS digunakan untuk mendapatkan penguat adaptif pada sliding mode control, sehingga diharapkan dapat meningkatkan respon controller serta tahan terhadap perubahan parameter karena gangguan. Observer kecepatan dipilih menggunakan metode MRAS observer, karena lebih sederhana dan mudah diaplikasikan.

1.2 Perumusan Masalah

Peningkatan performansi pembangkit listrik tenaga angin dapat dilakukan dengan meningkatkan efisiensi dan kualitas daya pembangkit. Peningkatan efisiensi dapat dilakukan dengan mendesain sistem kendali MPPT yang dapat menghasilkan daya output maksimum pada setiap variasi kecepatan angin. Sistem kendali MPPT terdiri dari algoritma MPPT dan kontroller kecepatan. Agar diperoleh daya maksimum pada setiap kecepatan angin, maka dibutuhkan algoritma MPPT yang akurat serta kontroller kecepatan yang handal.

Kontroller kecepatan generator dalam sistem kendali MPPT umumnya menggunakan konverter daya. Penggunaan konverter daya akan menurunkan kualitas daya pembangkit karena tingginya harmonisa yang ditimbulkan oleh frekuensi switching konverter. Untuk mengatasi hal ini perlu dirancang konverter daya yang dapat meminimalisir harmonisa, sehingga kualitas daya pembangkit dapat ditingkatkan.

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini penyelesaian masalah dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Pembangkit listrik tenaga angin didesain dengan menggunakan turbin angin horizontal tanpa gearbox dengan generator tipe PMSG dan konverter daya tipe VSMC.
2. Sistem kendali MPPT difokuskan pada pengembangan algoritma MPPT dan sistem kendali kecepatan generator.
3. Algoritma MPPT didesain menggunakan metode *Multiclass Least Squares Support Vector Machine*.
4. Kendali kecepatan generator didesain dengan metode *sensorless* FOC dengan strategi sudut torka konstan menggunakan metode *Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control*.
5. Estimator kecepatan rotor dirancang dengan menggunakan metode MRAS observer.

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut :

1. Memperoleh model konverter yang memiliki harmonisa rendah tanpa menggunakan DC link, sehingga dapat meningkatkan kualitas daya pembangkit listrik tenaga angin.
2. Memperoleh model sistem kendali MPPT untuk pembangkit listrik tenaga angin yang dapat menghasilkan daya output maksimum pada setiap variasi kecepatan angin.

Manfaat penelitian ini adalah dapat meningkatkan performansi pembangkit listrik tenaga angin yang berorientasi pada peningkatan efisiensi dan kualitas daya pembangkit. Peningkatan kualitas daya dilakukan dengan mengembangkan model konverter tanpa DC link serta memiliki harmonisa yang rendah dengan menggunakan VSMC. Peningkatan efisiensi diperoleh dari desain sistem kendali MPPT yang dapat menghasilkan daya output generator maksimum pada setiap variasi kecepatan angin.

1.5 Kontribusi Penelitian

Kontribusi utama penelitian ini adalah desain sistem kendali MPPT untuk pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan Very Sparse Matrix Converter (VSMC). Sistem kendali MPPT didesain dengan metode *sensorless* FOC, yang terdiri dari :

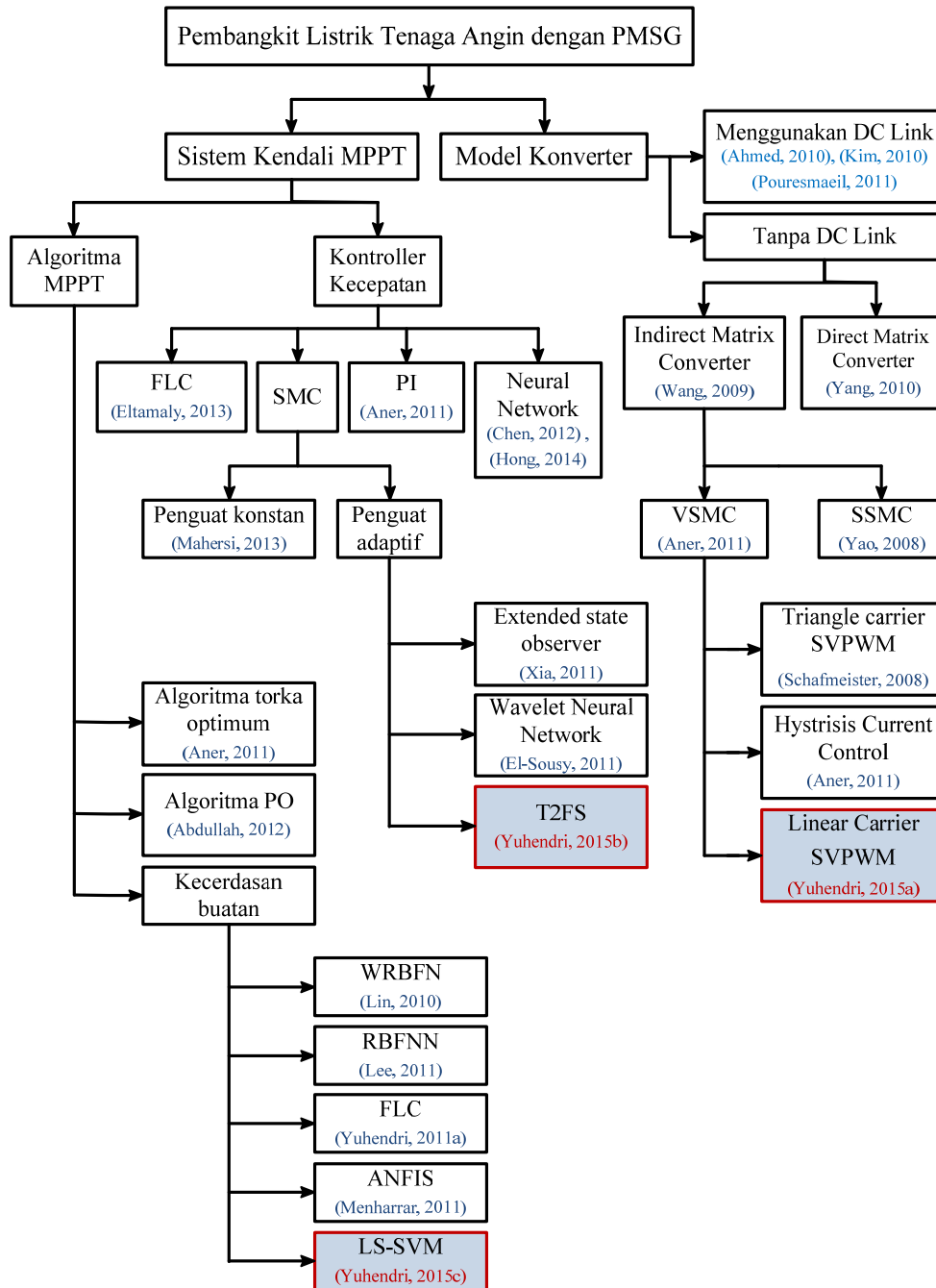
- a. Algoritma MPPT menggunakan metode *Multiclass Least Squares Support Vector Machine*.
- b. Kendali kecepatan generator dengan strategi sudut torka konstan menggunakan metode *Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control* (AFSMOC).

Penggunaan VMSC untuk pembangkit listrik tenaga angin telah dibahas oleh Aner (2011) dengan teknik modulasi *hysteresis current control*. Penggunaan VSMC dalam penelitian ini didesain dengan modulasi linear carrier SVPWM.

Kontribusi pertama terdapat pada rancangan algoritma MPPT. Algoritma MPPT yang telah dikembangkan untuk pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan VSMC adalah algoritma torka optimum (Aner, 2011). Metode ini membutuhkan parameter turbin angin yakni parameter koefisien daya maksimum, sehingga dibutuhkan pengujian turbin angin untuk mendapatkan parameter tersebut. Dalam penelitian ini, algoritma MPPT didesain berdasarkan algoritma PO dengan menggunakan LS-SVM. Nilai output algoritma PO berupa kecepatan referensi ditentukan berdasarkan perubahan daya output generator, sehingga tidak membutuhkan parameter turbin angin. LS-SVM digunakan untuk mendapatkan nilai step yang bervariasi, sehingga kelemahan algoritma PO konvensional yang menggunakan nilai step konstan dapat diatasi.

Kontribusi kedua adalah sistem kendali kecepatan generator dengan strategi sudut torka konstan menggunakan metode *sensorless* FOC berbasis *Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control* (AFSMOC). Kendali kecepatan generator yang telah diterapkan untuk PMSG yang menggunakan VSMC adalah metode FOC berbasis PI controller (Aner, 2011). Salah satu kelemahan PI controller adalah kurang tahan dengan perubahan parameter karena gangguan (Mahersi, 2013). AFSMOC digunakan untuk meningkatkan akurasi dan ketahanan controller dalam mengendalikan kecepatan generator. AFSMOC didesain berdasarkan konsep *Sliding Mode Control* (SMC).

SMC konvensional memiliki penguat konstan pada *sliding surface*. Hal ini mengurangi ketahanan controller menghadapi gangguan. Salah satu cara untuk meningkatkan ketahanan SMC adalah dengan mendesain penguat adaptif. Beberapa metode telah dikembangkan untuk mendapatkan penguat adaptif, seperti *Wavelet Neural Network* (El-Sousy, 2011) dan *extended state observer* (Xia, 2011). Dalam penelitian ini penguatan adaptif didesain menggunakan *Type-2 Fuzzy System* (T2FS). T2FS dengan memiliki fungsi keanggotaan *upper membership function* dan *lower membership function*, sehingga output T2FS lebih akurat dibandingkan T1FS (Mendel, 2006). Keunggulan T2FS ini diharapkan dapat performansi AFSMOC dalam mengendalikan kecepatan PMSG. Kontribusi penelitian dapat dilihat secara detail pada roadmap penelitian yang ditunjukkan oleh Gambar 1.3 dan penelusuran literatur pada Tabel 1.1.



Gambar 1.3 Roadmap penelitian

Tabel 1.1 Penelusuran publikasi dan kontribusi

No	Topik	Tahun						Keterangan
		Sampai 2010	2011	2012	2013	2014	2015	
1	Konverter daya Pembangkit listrik tenaga angin	(Yao, 2008) (Wang, 2009) (Ahmed, 2010) (Kim, 2010) (Yang, 2010)	(Aner, 2011) (Pouresmaeil, 2011) (Yuhendri, 2011b)					Studi awal konverter daya (Yuhendri, 2011b) : Prosiding Internasional
2	Teknik modulasi VSMC	(Kolar, 2007)	(Aner, 2011)				(Yuhendri, 2015a)	(Yuhendri, 2015a) : Prosiding nasional
4	Kontroller Kecepatan PMSG untuk pembangkit listrik tenaga angin		(Aner, 2011) (El-Sousy, 2011) (Xia, 2011)	(Chen, 2012)	(Eltamaly, 2013) (Mahersi, 2013)	(Hong, 2014)	(Yuhendri, 2015b)	(Yuhendri, 2015b) : Jurnal Internasional
5	Algoritma MPPT	(Lin, 2010) (Yuhendri, 2010)	(Aner, 2011) (Lee, 2011) (Menharrar, 2011) (Yuhendri, 2011a)	(Abdullah, 2012)	(Li, 2013)		(Yuhendri, 2015c)	(Yuhendri, 2010) : Prosiding Internasional (Yuhendri, 2011a) : Jurnal Internasional (Yuhendri, 2015c) : Jurnal Internasional

BAB 2

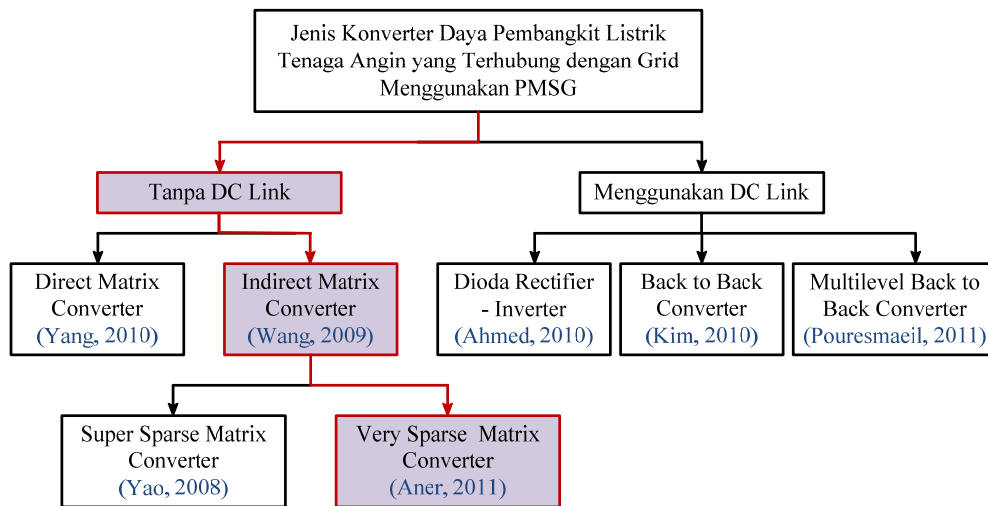
TINJAUAN SISTEM KONVERTER DAN TEKNIK KENDALI DAYA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

Dalam penelitian ini, pembangkit listrik tenaga angin dirancang dalam bentuk terhubung dengan grid, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.2. Komponen utama pembangkit listrik tenaga angin yang diilustrasikan Gambar 1.2 terdiri dari turbin angin, generator, konverter daya dan kontroller. Penelitian difokuskan pada pengembangan konverter untuk meningkatkan kualitas daya pembangkit dan pengembangan sistem kendali daya maksimum untuk meningkatkan efisiensi pembangkit.

Pembangkit listrik tenaga angin dirancang menggunakan turbin angin sumbu horizontal. Jenis turbin ini dipilih karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan turbin angin sumbu vertikal (Schubel, 2012). Untuk generator dipilih tipe *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), karena memiliki keunggulan antara lain : efisiensi lebih tinggi karena tidak ada kumparan jangkar yang dapat menimbulkan rugi daya, dapat dioperasikan pada kecepatan rendah tanpa gearbox, tidak membutuhkan eksitasi eksternal, kapasitas daya lebih besar dengan ukuran yang sama dan biaya pemeliharaan lebih murah (Goudarzi, 2013; Chinchilla, 2006).

2.1 Sistem Konverter Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Konverter daya pada pembangkit listrik tenaga angin berfungsi untuk menyalurkan daya dari generator ke grid atau sebaliknya serta sebagai media untuk mengendalikan pembangkit dari sisi generator, seperti sistem kendali kecepatan generator untuk mendapatkan daya output maksimum. Pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG umumnya menggunakan konverter skala penuh sesuai dengan daya generator. Berdasarkan studi literatur, konverter daya yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin yang terhubung dengan grid terbagi atas dua jenis, yaitu konverter yang menggunakan DC link dan konverter tanpa DC link. Gambar 2.1 menunjukkan jenis-jenis konverter yang telah diterapkan pada pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG.



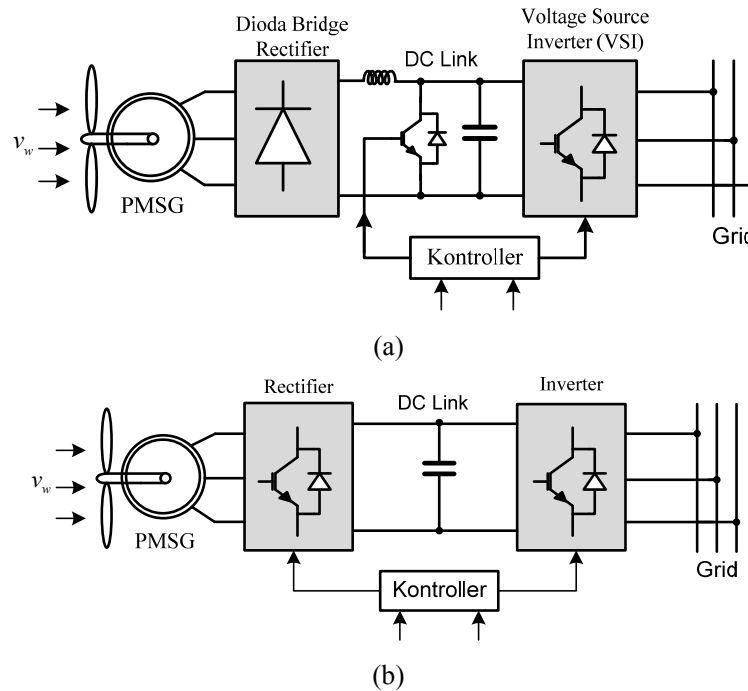
Gambar 2.1 Jenis konverter daya pembangkit listrik tenaga angin yang terhubung dengan grid menggunakan PMSG

2.1.1 Konverter Daya dengan DC Link

Konverter dengan DC link pada pembangkit listrik tenaga angin umumnya terdiri dari dua kelompok konverter, yaitu konverter pada sisi generator dan konverter pada sisi grid. Diantara kedua konverter tersebut terdapat DC link yang dilengkapi dengan penyimpan energi berupa kapasitor. Ada dua model konverter dengan DC link yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga angin, yaitu dioda rectifier – inverter dan back to back converter. Skema kedua model konverter ditunjukkan oleh Gambar 2.2. Untuk mendapatkan daya output maksimum, DRI juga dilengkapi dengan dc-dc konverter yang berfungsi untuk mengatur aliran daya aktif dari generator melalui pengaturan tegangan pada sisi DC link (Haque, 2010). Penggunaan dioda rectifier – inverter untuk pembangkit listrik tenaga angin yang memakai PMSG telah dibahas oleh Ahmed (2010), sedangkan penggunaan *back to back converter* telah dibahas oleh Baroudi (2007) dan Kim (2010).

Keunggulan dioda rectifier – inverter dan back to back converter adalah adalah lebih sederhana, murah dan teknik modulasi lebih mudah (Melicio, 2011), sedangkan kelemahannya adalah menggunakan DC link yang membutuhkan kapasitor ukuran besar dan sering tidak tahan lama. Selain itu, kedua konverter ini

juga menimbulkan masalah kualitas daya, karena besarnya harmonisa pada sisi grid akibat frekuensi switching (Yang, 2010). Untuk meningkatkan kualitas daya converter yang menggunakan dc link, telah dikembangkan multi level back to back converter oleh Pouresmaeil (2011). Tetapi konverter ini masih menggunakan DC link yang membutuhkan kapasitor ukuran besar sebagai penyimpan energi.



Gambar 2.2 Topologi konverter yang menggunakan DC link. (a) Diode rectifier-inverter, (b) back to back converter.

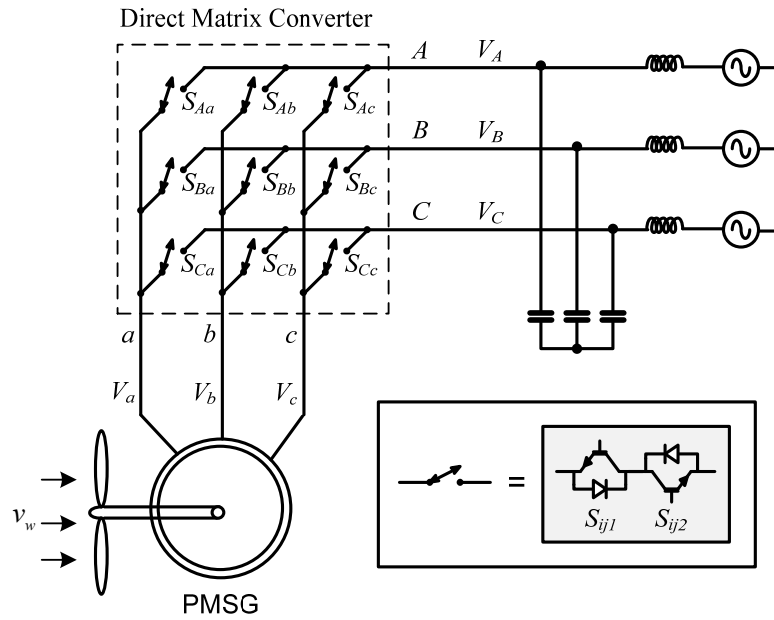
2.1.2 Konverter Daya tanpa DC Link

Untuk mengatasi permasalahan konverter yang menggunakan DC link, telah dikembangkan beberapa model konverter tanpa dc link. Keuntungan konverter tanpa dc link ini adalah selain tidak menggunakan dc link, konverter ini juga dapat menghasilkan gelombang arus sinusoidal pada kedua sisi, sehingga kualitas daya lebih bagus dibandingkan konverter dengan dc link (Yang, 2010).

Konverter daya tanpa DC link yang telah diterapkan pada pembangkit listrik tenaga angin adalah matrix converter. Berdasarkan struktur switchnya, ada 2 jenis matrix converter, yaitu direct matrix converter dan indirect matrix converter (Kolar, 2011).

2.1.2.1 Direct Matrix Converter

Direct matrix converter terdiri dari sembilan switch bidirectional yang disusun dalam bentuk matrik 3 x 3. Penggunaan direct matrix converter untuk pembangkit listrik tenaga angin yang memakai PMSG telah dibahas oleh Yang (2010). Skema direct matrix converter pada pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG ditunjukkan oleh Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema direct matrik konverter pada PMSG

Direct matrix converter pada Gambar 2.3 terdiri dari sembilan kelompok switch bidirectional yang tersusun dalam bentuk matrik yang menghubungkan setiap fasa input (A, B, C) ke setiap fasa output (a, b, c). Setiap kelompok switch terdiri dari dua transistor yang memiliki internal diode S_{ij1} dan S_{ij2} . Penggunaan switch bidirectional pada direct matrik konverter memungkinkan daya mengalir pada kedua sisi konverter. Persamaan tegangan direct matrix converter pada Gambar 2.3 dapat dipresentasikan dalam bentuk matrik 3 x 3 sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa} & S_{Ba} & S_{Ca} \\ S_{Ab} & S_{Bb} & S_{Cb} \\ S_{Ac} & S_{Bc} & S_{Cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Karena setiap switch bidirectional menggunakan dua buah switch S_{ij1} dan S_{ij2} dengan $i \in \{A, B, C\}$ dan $j \in \{a, b, c\}$, maka Persamaan (2-1) dapat juga diuraikan dalam bentuk matrik berikut :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa1} + S_{Aa2} & S_{Ba1} + S_{Ba2} & S_{Ca1} + S_{Ca2} \\ S_{Ab1} + S_{Ab2} & S_{Bb1} + S_{Bb2} & S_{Cb1} + S_{Cb2} \\ S_{Ac1} + S_{Ac2} & S_{Bc1} + S_{Bc2} & S_{Cc1} + S_{Cc2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

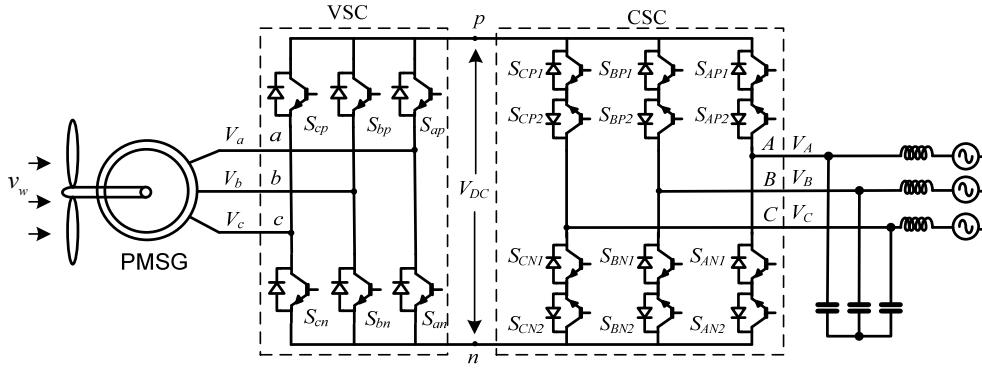
Persamaan (2-2) menunjukkan bahwa direct matrix converter memiliki 18 switch yang menghubungkan setiap fasa input ke setiap fasa output dalam bentuk matrik. Hal ini menunjukkan bahwa direct matrix converter menggunakan lebih banyak switch dibandingkan back to back converter, sehingga biaya pembuatannya lebih mahal. Struktur switch direct matrix converter yang tersusun dalam bentuk matrik membuat teknik modulasinya juga menjadi lebih rumit, karena sangat rentan terjadinya hubung singkat antar fasa (Wang, 2009).

2.1.2.2 Indirect Matrix Converter

Indirect matrix converter merupakan pengembangan dari direct matrix converter. Untuk mengatasi kompleksitas teknik modulasi direct matrix converter maka pada tahun 1989 dikembangkanlah teknik indirect space vector modulation oleh Borojevic (Wei, 2001). Struktur direct matrix converter dalam metode ini diubah menjadi dua kelompok konverter, yaitu kelompok Voltage Source Converter (VSC) dan Current Source Converter (CSC). Model konverter yang dihasilkan ini disebut juga dengan indirect matrix converter.

Penggunaan indirect space vector modulation membuat teknik modulasi indirect matrix converter menjadi lebih mudah seperti back to back converter, dimana VSC dan CSC dapat dimodulasi secara terpisah. Perbedaan indirect matrix converter dengan back to back converter terdapat pada struktur CSC dan dc link. Indirect matrix converter tidak menggunakan DC link yang membutuhkan kapasitor ukuran besar seperti yang terdapat pada back to back converter. Struktur CSC indirect matrix converter menggunakan switch bidirectional dengan dua transistor pada setiap kelompoknya, sedangkan pada back to back converter hanya menggunakan 1 transistor pada setiap kelompok switchnya (Wei, 2001).

Indirect matrix converter telah diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga angin oleh Wang (2009). Skema indirect matrix converter untuk pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG ditunjukkan oleh Gambar 2.4. Filter LC ditambahkan pada sisi grid untuk mengurangi harmonisa karena pengaruh frekuensi switching.



Gambar 2.4 Skema indirect matrix converter pada pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG

Gambar 2.4 menunjukkan bahwa struktur switch CSC terdiri dari 6 switch bidirectional S_{XY} dan setiap S_{XY} terdiri dari dua switch S_{XY1} dan S_{XY2} dengan $X \in \{A, B, C\}$ dan $Y \in \{P, N\}$, sedangkan bagian VSC terdiri dari 6 switch S_{xy} dengan $x \in \{a, b, c\}$ dan $y \in \{p, n\}$. Struktur switch direct matrix converter yang disusun dalam bentuk matrik pada Persamaan (2-1) dapat dianalogikan sebagai perkalian switch VSC dengan switch CSC pada indirect matrix converter, yang dijabarkan dalam bentuk persamaan :

$$[S_{ij}] = [S_{xy}][S_{XY}] \quad (2-3)$$

$$\begin{bmatrix} S_{Aa} & S_{Ba} & S_{Ca} \\ S_{Ab} & S_{Bb} & S_{Cb} \\ S_{Ac} & S_{Bc} & S_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ap} & S_{an} \\ S_{bp} & S_{bn} \\ S_{cp} & S_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{AP} & S_{BP} & S_{CP} \\ S_{AN} & S_{BN} & S_{CN} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

dengan

$$\begin{bmatrix} S_{AP} & S_{BP} & S_{CP} \\ S_{AN} & S_{BN} & S_{CN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{AP1} + S_{AP2} & S_{BP1} + S_{BP2} & S_{CP1} + S_{CP2} \\ S_{AN1} + S_{AN2} & S_{BN1} + S_{BN2} & S_{CN1} + S_{CN2} \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Jika variabel setiap switch diuraikan seperti Persamaan (2-2), maka Persamaan (2-3) dapat diuraikan sebagai berikut :

$$[S_{ij1} + S_{ij2}] = [S_{xy}][S_{XY1} + S_{XY2}] \quad (2-6)$$

$$\begin{bmatrix} S_{Aa1} + S_{Aa2} & S_{Ba1} + S_{Ba2} & S_{Ca1} + S_{Ca2} \\ S_{Ab1} + S_{Ab2} & S_{Bb1} + S_{Bb2} & S_{Cb1} + S_{Cb2} \\ S_{Ac1} + S_{Ac2} & S_{Bc1} + S_{Bc2} & S_{Cc1} + S_{Cc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ap} & S_{an} \\ S_{bp} & S_{bn} \\ S_{cp} & S_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{AP1} + S_{AP2} & S_{BP1} + S_{BP2} & S_{CP1} + S_{CP2} \\ S_{AN1} + S_{AN2} & S_{BN1} + S_{BN2} & S_{CN1} + S_{CN2} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

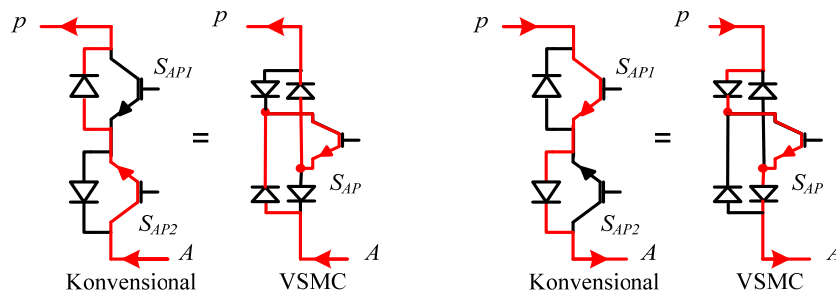
Persamaan (2-7) menunjukkan kesamaan antara struktur switch direct matrix converter dengan indirect matrix converter, dimana struktur switch direct matrix converter tersusun dalam matrik 3 x 3 sedangkan struktur switch indirect matrix converter tersusun dalam dua kelompok matrik. Persamaan (2-7) juga menunjukkan bahwa jumlah switch aktif indirect matrix converter sama dengan jumlah switch aktif direct matrix converter, yaitu 18 buah.

Jika dibandingkan dengan back to back converter, keunggulan indirect matrix converter adalah tidak menggunakan DC link yang membutuhkan kapasitor ukuran besar dan kualitas daya lebih baik, dimana bentuk tegangan sinusoidal dapat diperoleh hanya dengan menggunakan filter ukuran kecil pada sisi input (Round, 2006). Kekurangan indirect matrix converter adalah jumlah switch aktif yang digunakan lebih banyak dibandingkan back to back converter, sehingga biaya pembuatannya lebih mahal dibandingkan back to back converter.

Untuk meningkatkan nilai ekonomis indirect matrix converter telah dilakukan pengembangan oleh Kolar (2007) dengan cara mengurangi jumlah switch aktif CSC pada indirect matrix converter konvensional. Pengembangan ini melahirkan beberapa model indirect matrix converter, yaitu Sparse Matrix Converter, Very Sparse Matrix Converter, Super Sparse Matrix Converter, dan Inverting Link Matrix Converter (Kolar, 2007). Masing masing model memiliki keunggulan dan kelemahan sesuai dengan fitur yang dimilikinya.

2.1.2.3. Very Sparse Matrix Converter

Very Sparse Matrix Converter (VSMC) merupakan salah satu model indirect matrix converter yang dikembangkan oleh Kolar (2007). Pengembangan dilakukan dengan cara merubah struktur switch CSC pada indirect matrix converter yang menghasilkan jumlah switch aktif CSC pada VSMC lebih sedikit dibandingkan jumlah switch aktif CSC pada indirect matrix converter konvensional. Perubahan struktur CSC ditunjukkan oleh Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Struktur switch CSC indirect matrix converter dan VSMC (Schafmeister, 2008)

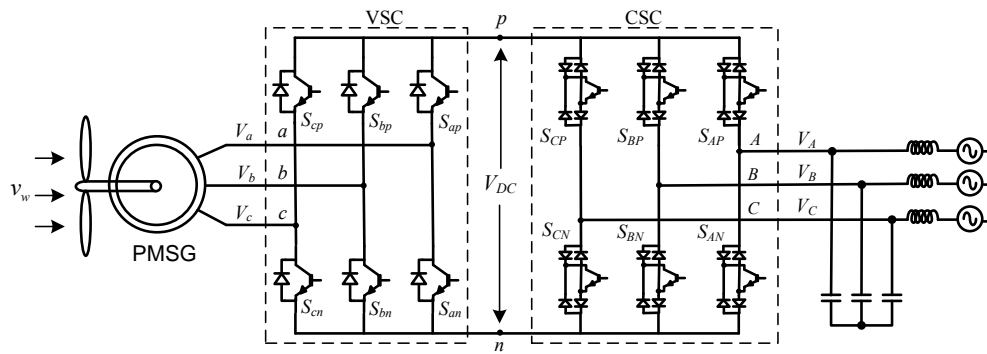
Gambar 2.5 menunjukkan perbedaan struktur CSC indirect matrix converter konvensional dengan struktur CSC pada VSMC, dimana keduanya memiliki fungsi yang sama. Pada indirect matrik konverter, CSC terdiri dari dua switch aktif dengan dua dioda, sedangkan CSC pada VSMC terdiri dari satu switch aktif dengan empat dioda. Hal ini membuat jumlah switch aktif CSC dapat direduksi dari 12 buah menjadi 6 buah dengan jumlah diode meningkat dari 12 buah pada CSC indirect matrik converter menjadi 24 buah pada VSMC.

VSMC telah diterapkan untuk pembangkit listrik tenaga angin oleh Aner (2011). Skema VSMC pada pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG ditunjukkan oleh Gambar 2.6, dimana bagian CSC dihubungkan dengan grid sedangkan bagian VSC dihubungkan dengan PMSG. Filter LC ditempatkan pada sisi grid untuk mengurangi harmonisa akibat frekuensi switching.

Gambar 2. 6 menunjukkan skema VSMC yang terdiri dari 6 switch aktif pada CSC dan 6 switch aktif pada VSC. Persamaan struktur switch VSMC dengan struktur switch direct matrix converter dan indirect matrix converter yang terdapat dalam Persamaan (2-7) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} S_{Aa1} + S_{Aa2} & S_{Ba1} + S_{Ba2} & S_{Ca1} + S_{Ca2} \\ S_{Ab1} + S_{Ab2} & S_{Bb1} + S_{Bb2} & S_{Cb1} + S_{Cb2} \\ S_{Ac1} + S_{Ac2} & S_{Bc1} + S_{Bc2} & S_{Cc1} + S_{Cc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ap} & S_{an} \\ S_{bp} & S_{bn} \\ S_{cp} & S_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{AP} & S_{BP} & S_{CP} \\ S_{AN} & S_{BN} & S_{CN} \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Persamaan (2-8) menunjukkan bahwa VSMC hanya terdiri dari 12 switch aktif sedangkan *direct matrix converter* dan *indirect matrix converter* terdiri dari 18 switch aktif. Hal ini membuat VSMC lebih ekonomis dibandingkan jenis konverter tanpa DC link lainnya.



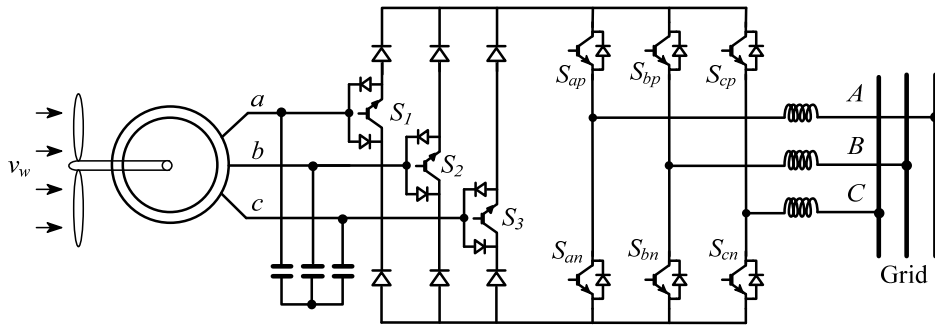
Gambar 2.6 Skema VSMC untuk pembangkit listrik tenaga angin

Berdasarkan Persamaan (2-2) dan (2-8), maka dapat dirumuskan persamaan tegangan VSMC berdasarkan status switching sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{ap}S_{AP}) + (S_{an}S_{AN}) & (S_{ap}S_{BP}) + (S_{an}S_{BN}) & (S_{ap}S_{CP}) + (S_{an}S_{CN}) \\ (S_{bp}S_{AP}) + (S_{bn}S_{AN}) & (S_{bp}S_{BP}) + (S_{bn}S_{BN}) & (S_{bp}S_{CP}) + (S_{bn}S_{CN}) \\ (S_{cp}S_{AP}) + (S_{cn}S_{AN}) & (S_{cp}S_{BP}) + (S_{cn}S_{BN}) & (S_{cp}S_{CP}) + (S_{cn}S_{CN}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

2.1.2.4. Super Sparse Matrix Converter

Selain VSMC, jenis konverter lain yang dihasilkan oleh Kolar pada tahun 2007 dan telah diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga angin adalah Super Sparse Matrix Converter (SSMC). Penggunaan SSMC untuk pembangkit listrik tenaga angin telah dibahas oleh Yao (2008). Gambar 2.7 menunjukkan skema SSMC untuk pembangkit listrik tenaga angin.



Gambar 2.7 Skema SSMC untuk pembangkit listrik tenaga angin

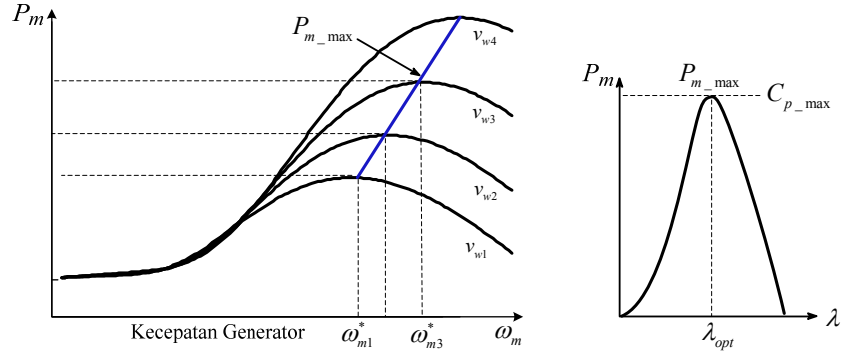
SSMC juga terdiri dari dua kelompok konverter, yaitu rectifier sumber tegangan dan inverter. Kelompok rectifier SSMC hanya menggunakan 3 switch aktif bentuk unidirectional, sedangkan kelompok inverter menggunakan 6 switch aktif, sama halnya dengan VSC pada VSMC. Karena rectifiernya bentuk satu arah, maka sisi rectifier ditempatkan di sisi generator. Hal ini berbeda VSMC, yang menempatkan VSC pada sisi generator.

Kelemahan SSMC adalah aliran arus hanya satu arah seperti DRI, sehingga tidak dapat dioperasikan dalam model regeneratif dan ripel torka yang dihasilkan lebih besar dibandingkan VSMC (Kolar, 2011). Hal ini berbeda dengan VSMC yang dapat dioperasikan pada empat kuadran switching dan kualitas daya yang lebih baik dibandingkan SSMC (Round, 2006). Berdasarkan fitur masing-masing konverter, maka dipilihlah VSMC sebagai konverter daya untuk pembangkit listrik tenaga angin dalam penelitian.

2.2 Sistem Kendali Daya Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Sistem kendali daya pembangkit listrik tenaga angin banyak dikembangkan untuk mendapatkan daya output maksimum pada setiap variasi kecepatan angin, yang disebut juga dengan *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Daya maksimum dapat diperoleh dengan mengendalikan kecepatan generator pada titik daya maksimum, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.8. Daya mekanik memiliki satu titik maksimum yang berada pada kecepatan yang berbeda pada setiap variasi kecepatan angin. Titik daya maksimum tersebut berada titik koefisien daya maksimum C_{p_max} dan titik *Tip Speed Ratio* (TSR) optimum λ_{opt} .

Koefisien daya adalah rasio daya mekanik turbin dengan daya angin yang ditangkap turbin, sedangkan TSR merupakan rasio kecepatan putaran jari-jari turbin dengan kecepatan angin (Abdullah, 2012).

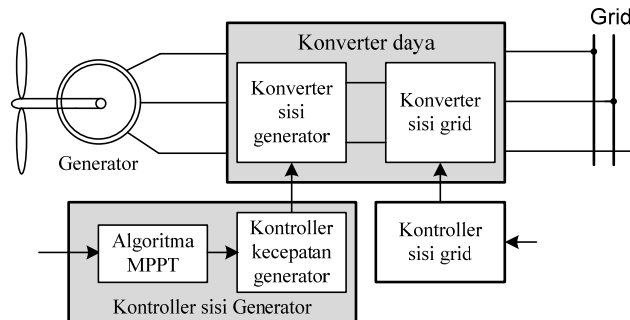


Gambar 2.8 Kurva daya turbin angin

Daya mekanik maksimum turbin angin dapat dirumuskan dengan :

$$P_{m_max} = 0.5 \rho A C_{p_max} \left(\frac{\omega_m^* R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \quad (2-10)$$

Untuk mendapatkan daya maksimum pada setiap variasi kecepatan angin maka kecepatan generator ω_m harus dikendalikan pada kecepatan referensi ω_m^* , seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8, yang lazim juga disebut dengan sistem kendali MPPT. Sistem kendali MPPT umumnya didesain pada sisi generator. Secara garis besar, sistem kendali MPPT terdiri dari algoritma MPPT dan kontroller kecepatan generator, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.9.



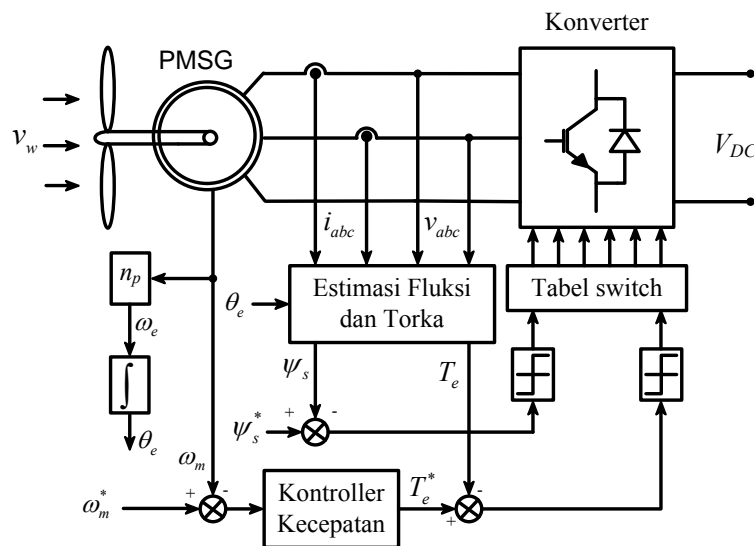
Gambar 2.9 Skema sistem kendali MPPT

Algoritma MPPT berfungsi untuk mendapatkan nilai referensi yang akan digunakan controller dalam mengendalikan kecepatan generator, sedangkan controller kecepatan generator berfungsi untuk mengendalikan kecepatan generator agar tetap berada pada kecepatan referensi untuk daya maksimum (Nasiri, 2014).

2.2.1 Kendali Kecepatan PMSG

Kendali kecepatan generator umumnya menggunakan metode kontrol vektor. Dalam metode ini, kecepatan generator dikendalikan melalui pengaturan torka dan fluksi secara terpisah, seperti pengaturan torka dan fluksi mesin arus searah (Bose, 2002). Ada dua metode kontrol vektor, yaitu Field Oriented Control (FOC) dan Direct Torque Control (DTC) (Bhavna, 2015).

DTC merupakan sistem kendali kecepatan melalui pengaturan torka elektromagnetik dan fluksi linkage secara langsung (Freire, 2012). Gambar 2.10 menunjukkan skema DTC untuk kendali kecepatan PMSG. Output controller kecepatan pada metode DTC adalah torka elektromagnetik referensi T_e^* , seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.10. Torka elektromagnetik referensi dibandingkan dengan torka elektromagnetik hasil estimasi T_e dan errornya akan menentukan status switching konverter berdasarkan aturan dalam tabel switch.

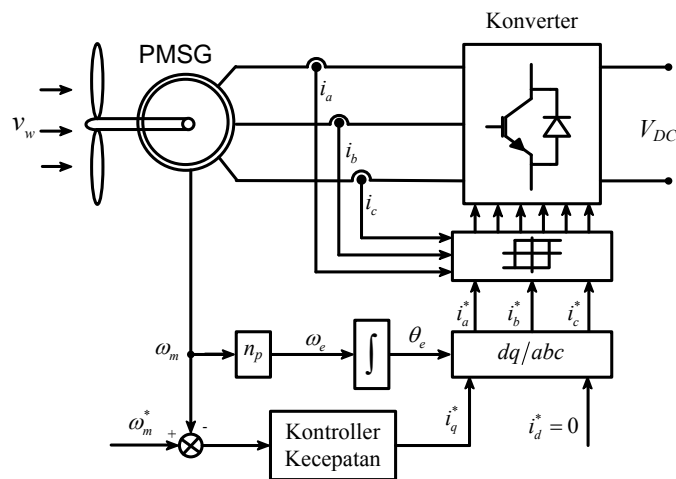


Gambar 2.10 Skema kendali kecepatan PMSG dengan metode DTC

Kelebihan metode DTC adalah struktur lebih sederhana dan tidak membutuhkan PWM, sedangkan kelemahannya adalah respon torka dan kecepatan kurang bagus dibandingkan metode FOC, terutama pada kecepatan rendah (Merzoug, 2008).

Berbeda dengan DTC, pengendalian torka dan fluksi linkage pada metode FOC dilakukan secara tidak langsung melalui arus stator (i_d^* , i_q^*) (Merzoug, 2008). Metode pengaturan i_d^* dan i_q^* tergantung kepada strategi FOC yang digunakan, seperti strategi sudut torka konstan, unity power factor, fluksi stator konstan dan maksimum torka per Ampere (Vas, 1998). Umumnya metode FOC untuk PMSG menggunakan strategi sudut torka konstan, karena lebih sederhana dan mudah diaplikasikan. Dalam metode ini, sudut torka dibuat konstan 90° dengan mengatur arus stator sumbu d menjadi nol, sehingga pengaturan kecepatan hanya melalui komponen torka, yakni i_q^* .

Gambar 2.11 menunjukkan skema FOC dengan strategi sudut torka konstan. Dalam metode ini, kecepatan referensi ω_m^* dibandingkan dengan kecepatan terukur ω_m dan errornya dijadikan referensi controller kecepatan dalam mengendalikan i_q^* .



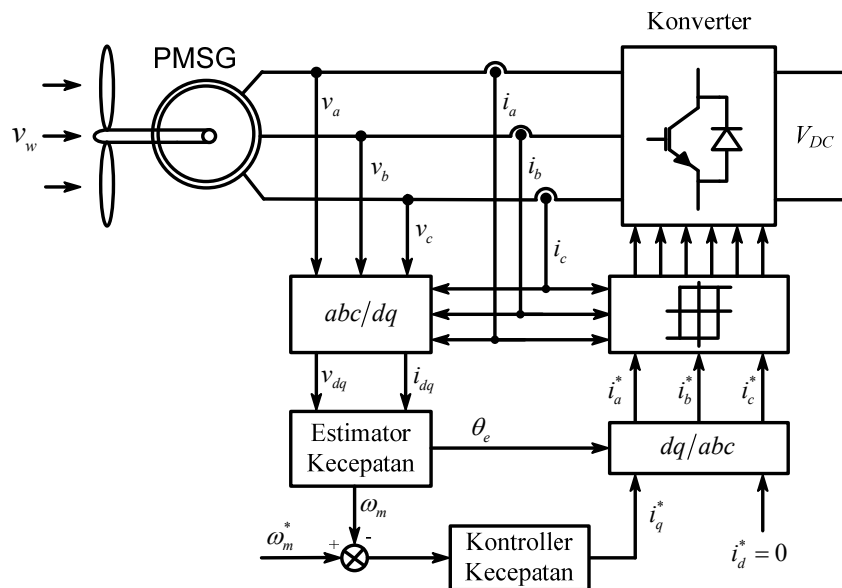
Gambar 2.11 Skema kendali kecepatan PMSG dengan metode FOC

Kelemahan metode FOC adalah algoritma lebih kompleks dan membutuhkan PWM untuk modulasi konverter, sedangkan kelebihan adalah

respon torka dan kecepatannya lebih bagus dibandingkan metode DTC (Merzoug, 2008). Berdasarkan kelebihan dan kekurangan FOC dan DTC, maka dalam penelitian ini dipilih metode FOC sebagai controller kecepatan generator untuk daya maksimum. Metode FOC dipilih karena respon torka dan kecepatannya lebih bagus dibandingkan metode DTC. Untuk meningkatkan nilai ekonomis sistem kendali, dewasa ini juga telah dikembangkan metode sensorless FOC. Dalam metode ini, sensor kecepatan diganti dengan estimator kecepatan, sehingga dapat menurunkan biaya pembuatan sistem kendali (Zhao, 2013).

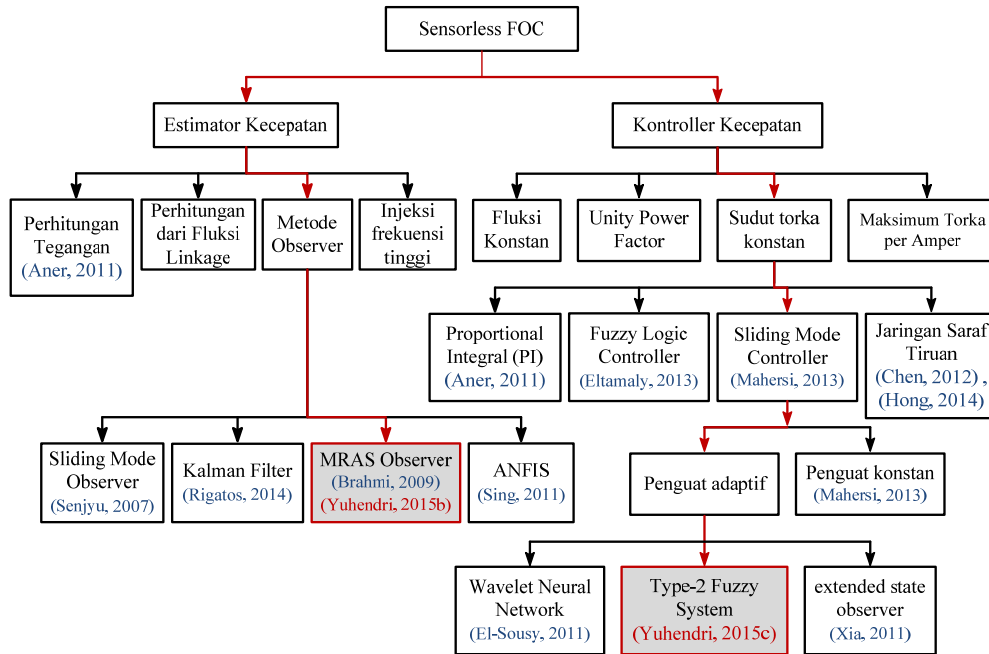
2.2.1.1 Sensorless Field Oriented Control

Kendali kecepatan PMSG berbasis sensorless (Field Oriented Control) FOC untuk sistem kendali MPPT pada pembangkit listrik tenaga angin telah dibahas oleh Chen (2012) dan Brahmi (2009). Secara garis besar, sensorless FOC terdiri dari estimator kecepatan dan controller kecepatan. Skema sensorless FOC untuk pembangkit listrik tenaga angin diilustrasikan pada Gambar 2.12. Estimator kecepatan berfungsi untuk mencari nilai kecepatan aktual dan posisi rotor, sedangkan controller kecepatan berfungsi untuk mengendalikan arus stator.



Gambar 2.12 Skema sensorless FOC

Berdasarkan studi literatur, beberapa metode estimator dan kontroler kecepatan telah dibahas oleh peneliti sebelumnya, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Estimator dan kontroler kecepatan dari metode sensorless FOC

2.2.1.1.1 Kontroler Kecepatan

Output kontroler kecepatan pada metode FOC dengan strategi sudut torka konstan adalah arus stator i_q^* . Berdasarkan studi literatur, beberapa metode kendali untuk pengaturan i_q^* telah dibahas oleh peneliti sebelumnya, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.13.

Setiap kontroler i_q^* yang telah dibahas oleh peneliti lain memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan PI controller yang diusulkan oleh Aner (2011) adalah sederhana dan mudah dirancang, tapi kurang tahan terhadap gangguan (Mahersi, 2013). Untuk meningkatkan ketahanan kontroler, telah digunakan Sliding Mode Control (SMC) oleh Mahersi (2013). Kinerja SMC dipengaruhi oleh penguat sliding surface. Salah satu cara untuk meningkatkan ketahanan SMC adalah dengan mendesain penguat adaptif pada sliding surface. Beberapa metode telah dikembangkan untuk mendapatkan penguat adaptif pada

sliding surface, seperti Wavelet Neural Network (El-Sousy, 2011) dan extended state observer (Xia, 2011).

Dalam penelitian ini, kendali arus i_q^* dirancang menggunakan metode SMC dengan penguat adaptif menggunakan Type-2 Fuzzy System (T2FS). Fungsi keanggotaan T2FS yang terdiri dari *upper membership function* dan *lower membership function* diharapkan dapat menghasilkan nilai penguat sliding surface yang lebih akurat dibandingkan metode sebelumnya, sehingga kehandalan SMC dalam mengendalikan kecepatan generator dapat ditingkatkan.

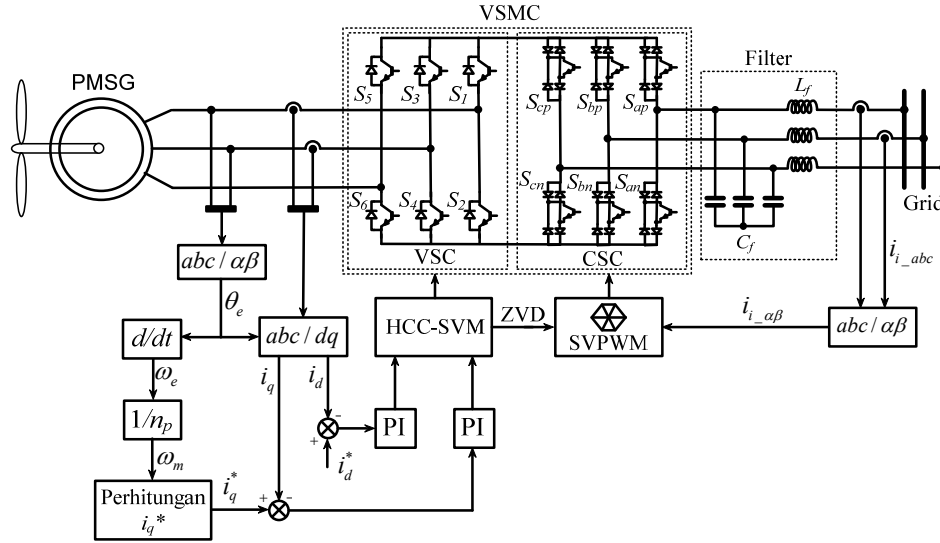
2.2.1.1.2 Estimator Kecepatan

Kecepatan generator dapat diestimasi dari back emf, fluksi linkage, injeksi frekuensi tinggi atau menggunakan observer (Vas, 1998; Yongdong, 2008). Metode observer merupakan metode yang banyak digunakan, karena lebih akurat dibandingkan metode lain (Brahmi, 2009). Berdasarkan studi literatur yang dilakukan, ada beberapa metode observer kecepatan PMSG yang telah dibahas oleh peneliti lain, seperti yang terdapat pada Gambar 2.13. Metode observer yang telah dikembangkan oleh peneliti lain adalah sliding mode observer (Senjyu, 2007), Model Reference Adaptive System (MRAS) observer (Brahmi, 2009), phase locked loop (Tong, 2013), extended kalman filter (Rigatos, 2014) dan observer berbasis kecerdasan buatan dengan menggunakan Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) (Sing, 2011).

Dalam penelitian ini dipilih MRAS observer sebagai estimator kecepatan, karena lebih sederhana dan mudah didesain. MRAS observer terdiri dari tiga blok utama, yaitu model referensi, model adaptif dan blok adaptasi mekanis (Brahmi, 2009). Parameter kecepatan PMSG diperoleh melalui adaptasi mekanis dari model referensi dan model adaptif arus stator dalam sumbu dq.

2.2.1.2 Sensorless Field Oriented Control Menggunakan VSMC

Kendali kecepatan PMSG dengan metode FOC menggunakan VSMC pada pembangkit listrik tenaga angin telah dibahas oleh Aner pada tahun 2011. Skema FOC menggunakan VSMC diilustrasikan oleh Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Sensorless FOC menggunakan VSMC (Aner, 2011)

Gambar 2.14 menunjukkan bahwa sensorless FOC didesain dengan strategi sudut torka konstan dengan mengatur i_d^* sama dengan nol, sedangkan arus stator i_q^* sebagai parameter yang diatur untuk mengendalikan kecepatan generator diperoleh melalui perhitungan. Arus stator referensi (i_d^* dan i_q^*) dibandingkan dengan arus terukur (i_d dan i_q) dan errornya dikontrol menggunakan PI controller. Output PI controller dijadikan referensi VSMC dalam mengatur tegangan dan frekuensi generator. Bagian VSC dari VSMC dimodulasi dengan metode Hysteris Current Control-Space Vector Modulation (HCC-SVM) dengan referensi arus, sedangkan bagian CSC dimodulasi dengan SVPWM. Kecepatan dan sudut rotor diestimasi dari tegangan. Perhitungan i_q^* menggunakan algoritma MPPT berbasis torka optimum berikut :

$$i_q^* = \frac{T_{opt}}{1.5 P \lambda} \quad (2-11)$$

dengan

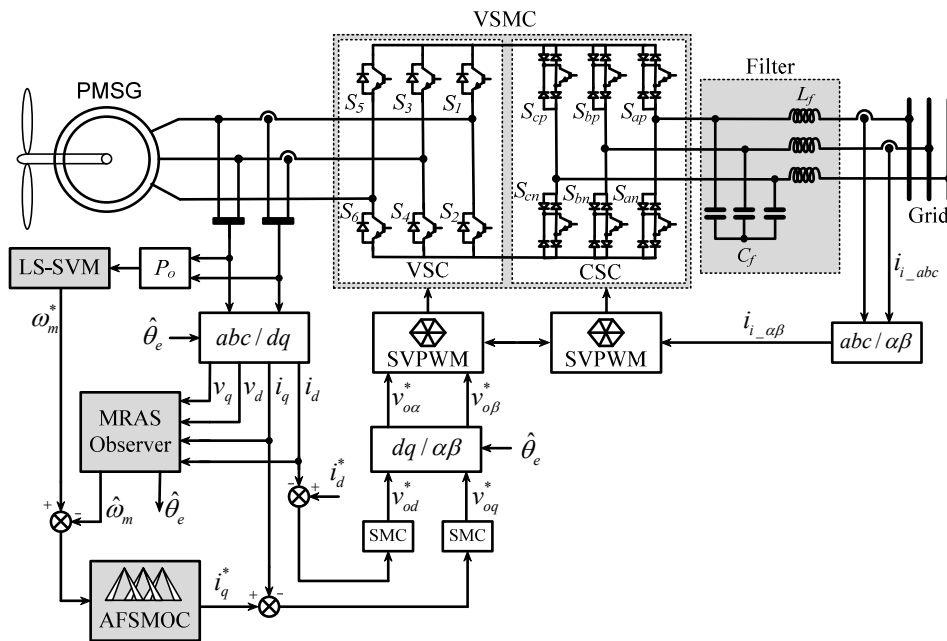
$$T_{opt} = \frac{P_{m_max}}{\omega_m} \quad (2-12)$$

$$P_{m_max} = 0.5 \rho \pi R^2 C_{p_max} v_w^3 \quad (2-13)$$

$$v_w = \frac{\omega_m R}{\lambda_{opt}} \quad (2-14)$$

Kelebihan metode sensorless FOC yang diilustrasikan pada Gambar 2.14 adalah lebih sederhana, karena i_q^* dapat diperoleh melalui perhitungan langsung menggunakan algoritma torka optimum. Kelemahannya adalah penggunaan PI controller membuat kendali kecepatan kurang tahan terhadap gangguan. Selain itu, algoritma torka optimum membutuhkan parameter turbin angin, seperti koefisien daya maksimum C_{p_max} dan TSR optimum λ_{opt} . Kedua parameter ini hanya dapat diperoleh melalui pengujian turbin angin.

Dalam penelitian ini, kendali kecepatan PMSG dengan metode sensorless FOC menggunakan VSMC dirancang seperti Gambar 2.15. Pengaturan i_q^* diusulkan menggunakan AFSMOC berdasarkan error kecepatan. Penggunaan AFSMOC diharapkan dapat memberikan respon kecepatan yang lebih tahan terhadap gangguan dibandingkan respon kecepatan dari PI controller. Kecepatan referensi ω_m^* diperoleh dari algoritma MPPT yang menggunakan metode LS-SVM. ω_m^* ditentukan berdasarkan perubahan daya output generator, sehingga tidak membutuhkan kecepatan angin maupun parameter turbin angin C_{p_max} dan λ_{opt} . Kecepatan ω_m dan sudut rotor θ_e diestimasi menggunakan Model Referensi Adaptive System (MRAS) observer.



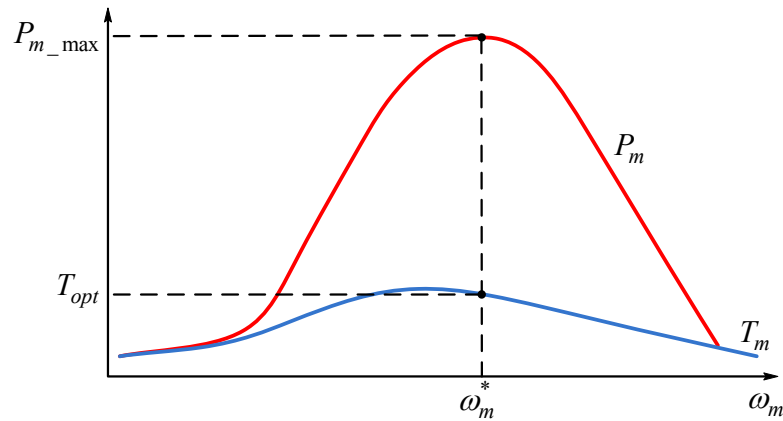
Gambar 2.15 Skema sensorless FOC menggunakan VSMC yang diusulkan.

2.2.2 Algoritma MPPT

Algoritma MPPT digunakan untuk mencari nilai suatu parameter yang akan digunakan kontroller sebagai referensi dalam mengendalikan daya agar tetap berada pada titik maksimum. Beberapa model algoritma MPPT telah diaplikasikan pada pembangkit listrik tenaga angin, seperti : algoritma torka mekanik optimum, *Perturbation and Observation* (PO) dan algoritma berbasis kecerdasan buatan (Abdullah, 2012; Nasiri, 2014).

2.2.2.1 Algoritma Torka Mekanik Optimum

Algoritma torka mekanik optimum bekerja berdasarkan karakteristik torka mekanik turbin angin. Karakteristik torka mekanik turbin angin ditunjukkan oleh Gambar 2.16. Torka mekanik bervariasi sesuai dengan perubahan kecepatan rotor, dimana setiap variasi kecepatan angin terdapat satu titik optimum dan satu titik maksimum. Titik optimum torka mekanik merupakan titik maksimum daya turbin angin. Nilai titik optimum ini lebih rendah dibandingkan titik maksimum, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Karakteristik torka mekanik turbin angin

Daya maksimum dapat diperoleh dengan mengendalikan torka mekanik pada titik optimum tersebut. Torka mekanik turbin angin dirumuskan dengan :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = 0.5 C_p (\lambda \beta) \rho \pi R^3 v_w^2 \quad (2-15)$$

Daya maksimum diperoleh ketika koefisien daya mencapai titik maksimum C_{p_max} dan nilai TSR berada pada titik optimum λ_{opt} , seperti yang terdapat pada Persamaan (2-10). Berdasarkan Persamaan (2-10) dan (2-15), maka torka mekanik optimum T_{opt} dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T_{opt} = 0.5 \rho A C_{p_max} \left(\frac{R}{\lambda_{opt}} \right)^3 (\omega_m^*)^2 \quad (2-16)$$

dengan

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} v_w}{R} \quad (2-17)$$

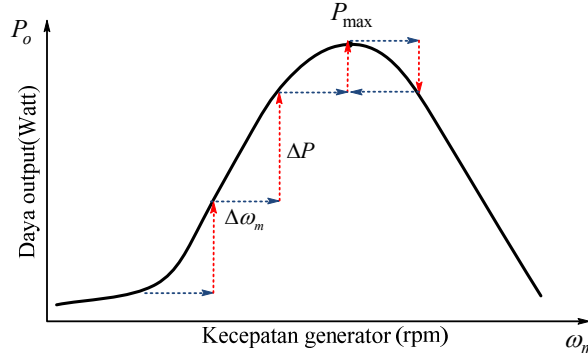
Nilai torka mekanik optimum dapat diperoleh dengan mengendalikan arus stator sumbu q .

Penggunaan algoritma torka mekanik optimum untuk mendapatkan daya maksimum pada pembangkit telah dibahas oleh Aner (2011). Kelemahan algoritma ini adalah membutuhkan data koefisien daya maksimum dan TSR optimum dalam menentukan nilai output (Abdullah, 2012). Kedua parameter ini hanya dapat diperoleh melalui pengujian turbin angin.

2.2.2.2 Algoritma Pertubasi dan Observasi

Algoritma Pertubasi dan Observasi (PO) merupakan salah satu teknik optimasi yang digunakan untuk mencari titik optimum sebuah fungsi (Abdullah, 2012). Metode ini didasarkan pada perubahan parameter kontrol dengan menggunakan step sampai dicapainya titik optimum. Respon algoritma PO ditentukan oleh ukuran step. Semakin besar ukuran step, maka semakin cepat responnya mencapai titik optimum.

Algoritma PO banyak digunakan dalam sistem kendali MPPT pembangkit listrik tenaga angin. Kelebihan algoritma ini adalah tidak membutuhkan parameter turbin dan data kecepatan angin. Dalam sistem kendali MPPT pembangkit listrik tenaga angin, algoritma PO umumnya digunakan untuk mencari kecepatan referensi generator pada titik daya maksimum berdasarkan perubahan daya output generator, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Prinsip kerja algoritma PO

Kecepatan referensi ω_m^* akan berubah sebesar ukuran step $\Delta\omega_m$ pada setiap perubahan daya. Output algoritma PO berupa kecepatan referensi untuk titik daya maksimum dapat dihitung dengan persamaan :

$$\omega_m^* = \begin{cases} \omega_{m(n-1)} + \Delta\omega_m & \text{jika } P_{o(n)} > P_{o(n-1)} \\ \omega_{m(n-1)} - \Delta\omega_m & \text{jika } P_{o(n)} < P_{o(n-1)} \end{cases} \quad (2-18)$$

dengan

$$P_o = P_{o(n-1)} + \Delta P \quad (2-19)$$

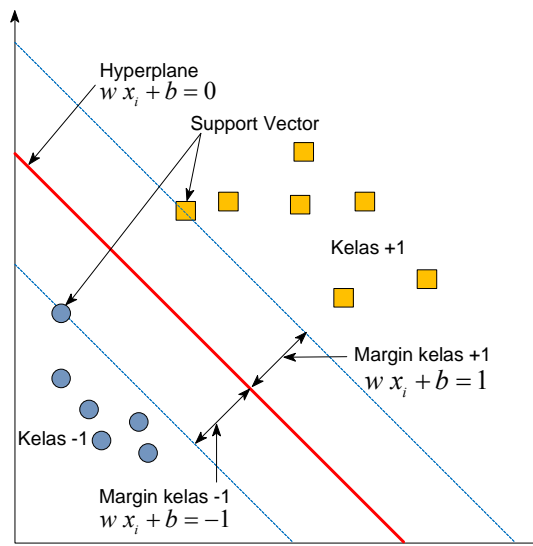
P_o adalah daya output generator, $P_{o(n-1)}$ adalah daya output sebelumnya dan ΔP adalah perubahan daya output generator. $\Delta\omega_m$ adalah ukuran step dan $\omega_{m(n-1)}$ adalah kecepatan generator sebelumnya.

Kinerja algoritma PO ditentukan oleh ukuran step $\Delta\omega_m$. Semakin besar ukuran step maka semakin cepat mencapai titik maksimum, tetapi ukuran step yang besar akan memperbesar riak kecepatan referensi pada titik maksimum (Li, 2013). Ukuran step yang kecil malah akan memperlambat respon algoritma untuk mencapai titik maksimum. Untuk mengatasi hal ini, telah dikembangkan algoritma PO dengan nilai step yang bervariasi dengan menggunakan beberapa kecerdasan buatan, seperti algoritma MMPT berbasis *Fuzzy Logic Controller* (Yuhendri, 2011a; Li, 2013), *ANFIS* (Menharrar, 2011), *Wilcoxon Radial Basis Function Network* (Lin, 2010) dan *Radial Basis Function Neural Network* (Lee, 2011). Dalam penelitian ini algoritma PO dengan nilai step yang bervariasi didesain menggunakan *Least Squares Support Vector Machine* (LS-SVM).

2.3 Least Squares Support Vector Machine

Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM) adalah salah satu metode *machine learning* yang dikembangkan dari *Support Vector Machine* (SVM) standar. SVM merupakan salah satu *statistic learning* yang bekerja atas prinsip *Structural Risk Minimization* (SRM) dengan tujuan untuk menemukan bidang pemisah (*hyperplane*) terbaik dengan memisahkan dua buah kelas data pada bidang input (Vapnik, 1999). Berbeda dengan prinsip *Empirical Risk Minimization* (ERM) yang dipakai pada *Neural Network*, SRM bertujuan untuk meminimalkan *actual risk* atau error pengujian dengan cara meminimalkan *empirical risk* atau rata-rata error training dan dimensi *Vapnik-Chervokinensis* (VC), sehingga generalisasi SVM dapat ditingkatkan, yaitu kemampuan untuk mengklasifikasikan data pengujian yang tidak terdapat dalam data training (Suykens, 1999a).

Prinsip dasar SVM adalah linear classifier untuk data *linear separable* atau data yang dapat dipisahkan secara linear, seperti data biner. Gambar 2.18 menunjukkan struktur SVM yang terdiri dari dua kelas data biner.



Gambar 2.18 Struktur SVM

Gambar 2.21 menunjukkan kelas data biner +1 dan -1 yang dipisahkan oleh garis *hyperplane*. Klasifikasi data diartikan sebagai usaha untuk mencari

garis *hyperplane* terbaik antara kedua kelas data. *Hyperplane* terbaik dapat diperoleh dengan memaksimalkan nilai bidang pembatas atau margin, yaitu jarak terdekat *hyperplane* dengan data input (Boser, 1992). Data yang paling dekat dengan *hyperplane* disebut sebagai *support vector*.

Untuk klasifikasi biner seperti Gambar 2.18 dengan data training $[x_i, y_i]$, dimana x_i adalah data input dan y_i adalah output dengan kelas +1 dan -1, maka nilai margin masing masing kelas data adalah:

$$\begin{cases} w x_i + b \geq +1, & \text{jika } y_i = +1 \\ w x_i + b \leq -1, & \text{jika } y_i = -1 \end{cases} \quad (2-20)$$

w adalah pembobot dan b adalah bias. Secara umum Persamaan (2-20) dapat dipresentasikan dengan pertidaksamaan berikut :

$$y_i [w x_i + b] - 1 \geq 0 \quad (2-21)$$

Hyperplane terbaik diperoleh dengan memaksimalkan nilai margin, yang diperoleh dengan memaksimal jarak *hyperplane* dengan titik data terdekat ($1/|w|$). Memaksimalkan $1/|w|$ sama dengan meminimalkan $|w|^2$, sehingga nilai maksimal margin dapat dipresentasikan melalui fungsi optimasi dengan batasan berikut :

$$\min_{w,b} J(w) = \frac{1}{2} |w|^2 \text{ dengan batasan } y_i [w x_i + b] - 1 \geq 0 \quad (2-22)$$

Persamaan (2-22) hanya berlaku untuk data linear separable, sedangkan di dunia nyata banyak data yang bersifat non-linear separable. Untuk data non-linear separable, SVM harus dimodifikasi menggunakan teknik soft margin, sehingga margin menjadi fleksibel. Hal ini dapat dilakukan menggunakan fungsi tranformasi $g(x)$ dan menambahkan variable slack ξ_i , sehingga fungsi optimasi pada Persamaan (2-22) dimodikasi dalam bentuk primal menjadi :

$$\min_{w,b,\xi} J(w, \xi) = \frac{1}{2} w^T w + c \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (2-23)$$

dengan batasan

$$y_i [w^T g(x_i) + b] \geq 1 - \xi_i \text{ dengan } \xi_i \geq 0 \quad (2-24)$$

c adalah parameter regulasi. Fungsi transformasi $g(x_i)$ digunakan untuk memetakan ruang input ke ruang berdimensi lebih tinggi (ruang fitur) tanpa harus mendefinisikan fungsi pemetaan, sehingga diharapkan data non-linear separable pada ruang input menjadi linear separable pada ruang fitur.

Pencarian nilai minimum w , b dan ξ pada Persamaan (2-23) dan (2-24) merupakan fungsi optimasi dengan batasan dalam bentuk pemograman kuadratik, dimana fungsi tujuan berbentuk kuadrat dengan batasan berbentuk linear. Persamaan ini dapat diselesaikan dengan perkalian Lagrange dalam bentuk primal sebagai berikut :

$$L(w, b, \xi, \alpha) = J(w, \xi) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{ y_i [w^T g(x_i) + b] - 1 + \xi_i \} - \sum_{i=1}^n v_i \xi_i \quad (2-25)$$

α adalah parameter perkalian Lagrange dengan $\alpha_i \geq 0$ dan $v_i \geq 0$. Persamaan (2-25) dapat diselesaikan dengan ketentuan :

$$\max_{\alpha} \min_{w, b, \xi} L(w, b, \xi ; \alpha) \quad (2-26)$$

Nilai minimum w , b dan ξ diperoleh dengan menurunkan $L(w, b, \xi)$ terhadap w dan b dengan ketentuan *Karush Kuhn Tucker* (KKT) berikut :

$$\min_{w, b, \xi} L(w, b, \xi) \rightarrow \begin{cases} \frac{dL}{dw} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i g(x_i) \\ \frac{dL}{db} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \\ \frac{dL}{d\xi} = 0 \rightarrow 0 \leq \alpha_i \leq c \end{cases} \quad (2-27)$$

Penyelesaian persamaan (2-27) dilakukan dengan mencari nilai maksimal α menggunakan fungsi pemograman kuadratik dalam bentuk dual berikut :

$$\max_{\alpha_i} L(\alpha_i; g(x_i)) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n y_i y_j g(x_i)^T g(x_j) \alpha_i \alpha_j + \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (2-28)$$

dengan subjek batasan :

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad \text{dengan} \quad 0 \leq \alpha_i \leq c \quad (2-29)$$

Berdasarkan teori Mercer, perkalian $g(x_i)g(x_j)$ pada Persamaan (2-28) dapat digantikan dengan fungsi Kernel $K(x, x_i)$ yang disebut juga dengan *Kernel Trick* (Suykens, 2001). Hal ini dilakukan karena fungsi $g(x_i)$ yang memetakan data x_i ke ruang vektor yang berdimensi lebih tinggi sulit diketahui. Ada beberapa metode *Kernel Trick* yang dapat dipakai, yaitu :

1. Linear kernel : $K(x, x_i) = x_i^T x$
2. Polynomial kernel : $K(x, x_i) = (x_i^T x + 1)^d$
3. Radial Basis Function (RBF) kernel : $K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right)$
4. Multilayer Perceptron kernel : $K(x, x_i) = \tanh(x_i^T x + \theta)$

Setelah parameter kernel $K(x, x_i)$ dan parameter perkalian Lagrange α diperoleh, maka fungsi klasifikasi SVM dalam bentuk dual dirumuskan menjadi :

$$y(x) = \text{sig} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x, x_i) + b \right] \quad (2-30)$$

Dalam training, hanya nilai $\alpha > 0$ yang akan mempengaruhi klasifikasi data, yang disebut juga dengan nilai support.

Salah satu keuntungan SVM adalah metode SRM membuat SVM bersifat optimum global, sedangkan kelemahannya adalah ukuran matrik dalam pemrograman kuadratik sebanding dengan jumlah data training, sehingga akan sangat memberatkan proses training untuk jumlah data yang besar (Suykens, 2003). Kompleksitas pemrograman kuadratik juga membuat waktu training menjadi lebih lama. Beberapa metode telah diusulkan untuk menyelesaikan pemrograman kuadratik, seperti metode Interior Point, Sequential Minimal Optimization dan Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM) (Gestel, 2004).

LS-SVM dikembangkan oleh *Suykens dan Vandewalle* pada tahun 1999. Dalam metode ini, masalah pemrograman kuadratik pada SVM diselesaikan dengan persamaan linear (Gestel, 2004). Hal ini membuat waktu training menjadi

lebih singkat dari n^3 menjadi n^2 . LS-SVM dibentuk dengan mengubah batasan fungsi optimasi pada Pertidaksamaan (2-24) menjadi persamaan, sehingga fungsi pada Persamaan (2-23) dan (2-24) menjadi :

$$\min_{w,b,e} J(w,e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{c}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (2-31)$$

dengan subjek batasan :

$$y_i [w^T g(x_i) + b] = 1 - e_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2-32)$$

Persamaan (2-31) dan (2-32) diselesaikan dengan perkalian *Lagrange* berikut :

$$L(w, b, e; \alpha) = J(w, b, e) - \sum_{i=1}^n \alpha_i (y_i \{w^T g(x_i) + b\} - 1 + e_i) \quad (2-33)$$

Parameter perkalian Lagrange α dapat bernilai positif atau negatif. Kondisi optimal diperoleh dengan menurunkan $L(w, b, e)$ berdasarkan ketentuan KKT berikut :

$$\frac{dL}{dw} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i g(x_i) \quad (2-34)$$

$$\frac{dL}{db} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (2-35)$$

$$\frac{dL}{de_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = c e_i \quad (2-36)$$

$$\frac{dL}{d\alpha_i} = 0 \rightarrow y_i [w^T g(x_i) + b] - 1 + e_i = 0 \quad (2-37)$$

Dari Persamaan (2-34)-(2-37) dapat dibuat persamaan linear dalam bentuk matrik berikut :

$$\begin{bmatrix} I & 0 & 0 & -Z^t \\ 0 & 0 & 0 & -Y^t \\ 0 & 0 & c I & -I \\ Z & Y & I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ b \\ e \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

dengan $Z = [g(x_1)' y_1, \dots, g(x_n)' y_n]$, $Y = [y_1, \dots, y_n]$, $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_n]$, $1 = [1, \dots, 1]$, $e = [e_1, \dots, e_n]$ dan I adalah matrik identitas $n \times n$.

Dengan mengeliminasi w dan e , maka Persamaan (2-38) dapat disederhanakan menjadi :

$$\begin{bmatrix} 0 & Y' \\ Y & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

dengan

$$G = Z Z' + c^{-1} I = y_i y_j g(x_i)' g(x_j) + c^{-1} I \quad (2-40)$$

Berdasarkan teori Mercer, perkalian $g(x_i)g(x_j)$ dalam Persamaan (2-40) dapat digantikan dengan fungsi Kernel $K(x, x_i)$. Berdasarkan Persamaan (2-39), dapat dirumuskan parameter perkalian Lagrange α sebagai berikut :

$$\alpha = G^{-1}(1 - Yb) \quad (2-41)$$

Nilai b dapat diperoleh dengan mensubsitusikan Persamaan (2-41) ke dalam Persamaan (2-39), sehingga menghasilkan persamaan :

$$b = \frac{Y' G^{-1} 1}{Y' G^{-1} Y} \quad (2-42)$$

Setelah nilai b dan α diketahui, maka fungsi klasifikasi LS-SVM dalam bentuk dual dapat dirumuskan dengan :

$$y(x) = \text{sig} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x, x_i) + b \right] \quad (2-43)$$

2.3.1 Multiclass Least Squares Support Vector Machine

Selain klasifikasi kelas biner, LS-SVM juga dapat digunakan untuk klasifikasi data kelas jamak (*multiclass*). Pada kelas biner, output LS-SVM hanya diklasifikasikan dalam dua kelas, yaitu kelas 1 dan -1. Dalam metode multiclass, output LS-SVM dapat diklasifikasikan lebih dari dua kelas dan tidak terpaku hanya pada data 1 dan -1 (Suykens, 1999b; Gestel, 2002).

Proses klasifikasi LS-SVM hanya dapat dilakukan untuk data biner. Untuk mendapatkan output kelas jamak maka digunakan metode encode dan decode. Encode berfungsi untuk mengubah data real output menjadi data biner sebelum proses klasifikasi, sedangkan decode berfungsi untuk mengubah data biner hasil klasifikasi menjadi data real. Metode encode yang dapat digunakan antara lain : minimum output coding, error correcting output code, one versus all coding dan one versus one coding (Gestel, 2004).

Jika diberikan data training (y_k^i, x_k) dengan $k = [1, \dots, n]$ adalah kelas ke- k , $i = [1, \dots, m]$ adalah data ke- i , y adalah data output dan x adalah data input, maka fungsi optimasi untuk mendapatkan *hyperplane* terbaik dirumuskan dengan :

$$\min_{w_i, b_i, e_{k,i}} J^m(w_i, b_i, e_{k,i}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m w_i' w_i + \frac{c}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m e_{k,i}^2 \quad (2-44)$$

dengan subjek batasan :

$$\begin{cases} y_k^1 [w_1' g_1(x_k) + b_1] = 1 - e_{k,1} \\ y_k^2 [w_2' g_2(x_k) + b_2] = 1 - e_{k,2} \\ \dots \\ y_k^m [w_m' g_m(x_k) + b_m] = 1 - e_{k,m} \end{cases} \quad (2-45)$$

Fungsi optimasi pada Persamaan (2-44) dan (2-45) diselesaikan dengan perkalian Lagrange berikut :

$$L^m(w_i, b_i, e_{k,i}; \alpha_{k,i}) = J^m - \sum_{k,i} \alpha_{k,i} (y_k^i [w_i' g_i(x_k) + b_i] - 1 + e_{k,i}) \quad (2-46)$$

Kondisi optimal diperoleh berdasarkan ketentuan KKT berikut :

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dw_i} = 0 & \rightarrow w = \sum_{k=1}^n \alpha_{k,i} y_k^i g_i(x_k) \\ \frac{dL}{db_i} = 0 & \rightarrow \sum_{k=1}^n \alpha_{k,i} y_k^i = 0 \\ \frac{dL}{de_{k,i}} = 0 & \rightarrow \alpha_{k,i} = c e_{k,i} \\ \frac{dL}{d\alpha_{k,i}} = 0 & \rightarrow y_i [w_i' g_i(x_k) + b_i] = 1 - e_{k,i} \end{aligned} \quad (2-47)$$

Dengan mengeliminasi w dan e maka diperoleh persamaan linear dalam bentuk matrik berikut :

$$\begin{bmatrix} 0 & Y_M^t \\ Y_M & G_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_M \\ \alpha_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

dengan

$$Y_M = \text{blockdiag} \left\{ \begin{bmatrix} y_1^1 \\ \dots \\ y_n^1 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} y_1^m \\ \dots \\ y_n^m \end{bmatrix} \right\} \quad (2-49)$$

$$G_M = \text{blockdiag} \{ G_{kl}^1, \dots, G_{kl}^m \} \rightarrow G_{kl}^i = y_k^i y_l^i K_i(x_k, x_l) + c^{-1} I \quad (2-50)$$

$K_i(x_k, x_l)$ adalah fungsi kernel yang dapat diselesaikan dengan beberapa metode *Kernel Trick*. Nilai a dan b dalam Persamaan (2-48) dapat diperoleh dengan penyelesaian mengacu kepada bentuk Persamaan (2-41) dan (2-42). Setelah nilai a dan b didapatkan, maka fungsi klasifikasi multiclass LS-SVM dalam bentuk dual dapat dirumuskan dengan :

$$y_k^i(x_k) = \text{sig} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_{k,i} y_k^i K_i(x, x_k) + b_i \right] \quad (2-51)$$

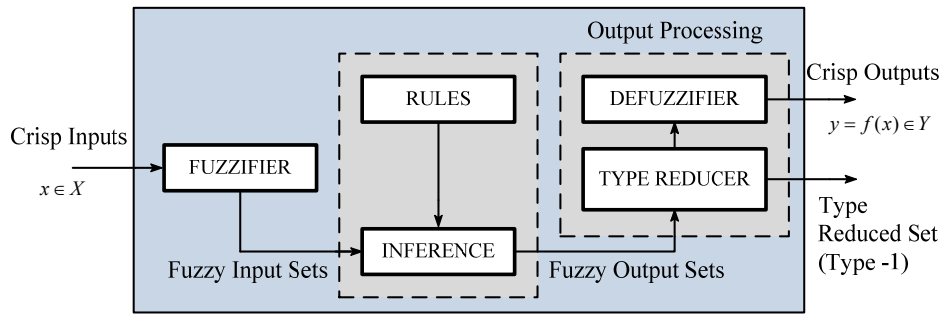
Output klasifikasi data pada Persamaan (2-51) masih bersifat biner. Untuk mengubah data biner menjadi data real, maka dilakukan decode data. Decode data dapat dilakukan dengan metode *hamming distance* atau *bayesian distance measure* (Gestel, 2002)

Validitas training multiclass LS-SVM dapat dievaluasi menggunakan overall accuracy, producer accuracy dan user accuracy berdasarkan matrik konfusi. Overall accuracy adalah jumlah sampel data yang terklasifikasi dengan benar. Producer accuracy mempresentasikan data set yang terklasifikasi secara benar dalam sebuah kelas, sedangkan user accuracy adalah data set yang terklasifikasi secara benar untuk sebuah kelas (Zhang, 2012).

2.4 Type-2 Fuzzy System

Type-2 Fuzzy System (T2FS) merupakan pengembangan dari *Type-1 Fuzzy System* (T1FS). Salah satu kekurangan T1FS adalah memiliki keterbatasan dalam mengatasi ketidakpastian karena memiliki fungsi keanggotaan yang tegas, sementara disatu sisi basis pengetahuan dalam sistem logika fuzzy memiliki ketidakpastian (Karnik, 1999). Untuk mengatasi ketidakpastian ini, telah dikembangkan T2FS oleh Zadeh pada tahun 1975 menggunakan fungsi keanggotaan interval yang memiliki *Footprint of Uncertainty* (FOU) yang dibatasi oleh *upper membership function* dan *lower membership function* (Liang, 2000).

Struktur T2FS mirip dengan T1FS, yang terdiri dari fuzzifikasi, inferensi fuzzy, rule base dan pengolah output yang terdiri dari reduksi tipe dan defuzzifikasi, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Struktur Type-2 Fuzzy System

2.4.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah proses memetakan data real input (*crisp input*) ke dalam himpunan fuzzy dengan variabel linguistik. Fungsi keanggotaan sebuah data pada himpunan fuzzy dapat dipresentasikan dalam berbagai bentuk, seperti segitiga, trapesium ataupun gaussian.

Jika crisp input x dimasukkan ke dalam himpunan fuzzy F , maka fungsi keanggotaannya dapat dinyatakan dengan $\mu_F(x)$. Bentuk umum himpunan fuzzy F adalah :

$$F = \int_{x \in X} \mu_F(x) / x = \int_{x \in X} \left[\int_{x \in J_x} 1/u \right] / x, \quad J_x \subseteq U = [0,1] \quad (2-52)$$

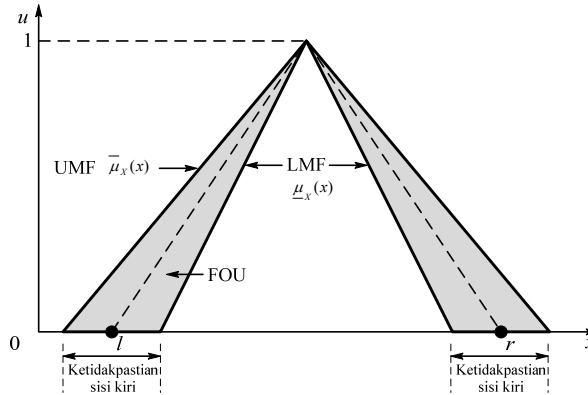
T2FS memiliki dua bentuk fungsi keanggotaan, yaitu *lower membership function* (LMF) $\underline{\mu}_x(x)$ dan *upper membership function* (UMF) $\bar{\mu}_x(x)$, sehingga fungsi keanggotaan himpunan fuzzy F dapat dinyatakan dengan :

$$\mu_F(x) = \int_{q \in [\underline{\mu}_x(x), \bar{\mu}_x(x)]} 1/q \quad (2-53)$$

Daerah antara LMF dan UMF disebut *Footprint of Uncertainty* (FOU). FOU himpunan fuzzy F dinyatakan dengan :

$$\text{FOU}(F) = \bigcup_{x \in X} J_x \quad (2-54)$$

Gambar 2.20 menunjukkan contoh fungsi keanggotaan T2FS dalam bentuk segitiga dengan ketidakpastian lebar.



Gambar 2.20 Fungsi keanggotaan Type-2 Fuzzy System bentuk segitiga

2.4.2 Rule Base

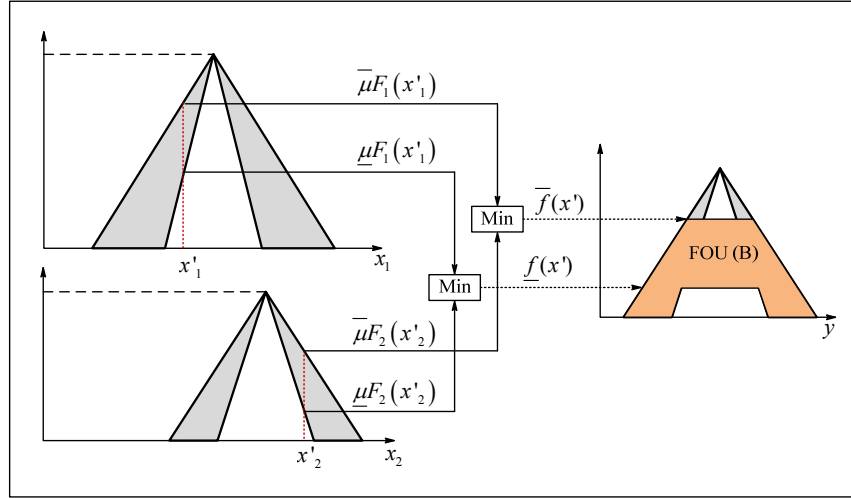
Rule base berisi aturan atau kaidah yang menghubungkan anteseden dengan konsekuensi berdasarkan fungsi implikasi. Bentuk umum aturan T2FS sama dengan T1FS yang dipresentasikan dengan hukum *if - then*. Misalkan T2FS dengan *Multi Input Single Output* (MISO) memiliki aturan sebanyak m dan anteseden sebanyak p , maka kaidahnya dapat dirumuskan dengan (Liang, 2000) :

$$R^l : \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_p \text{ is } F_p^l \text{ THEN } y \text{ is } G^l, \quad l = 1, \dots, m \quad (2-55)$$

dimana F adalah fuzzy set input dan G adalah fuzzy set output

2.4.3 Inferensi Fuzzy

Inferensi fuzzy adalah proses memetakan fuzzy set input ke fuzzy set output berdasarkan kaidah yang ada pada rule base. Ada dua metode operasi yang dapat digunakan untuk inferensi T2FS, yaitu operasi meet Π dan operasi join \sqcup (Mendel, 2006). Gambar 2.21 menunjukkan bentuk operasi meet inferensi T2FS.



Gambar 2.21 Inferensi T2FS dengan operasi meet

Gambar 2.21 menunjukkan sebuah T2FS dengan input $[x_1, x_2]$ dan output y . Setiap input memiliki interval yang dibatasi oleh $[\underline{\mu}_F, \overline{\mu}_F]$ dengan firing strength $F = [\underline{f}, \overline{f}]$, dimana \underline{f} dalam t-norm LMF dan \overline{f} dalam t-norm UMF.

Berdasarkan rule dalam Persamaan (2-55), inferensi T2FS dengan operasi meet dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\mu_{R^l} = \mu_{F_1^l}(x_1) \Pi \dots \Pi \mu_{F_p^l}(x_p) \Pi \mu_{G^l}(y) \quad (2-56)$$

dengan firing strength :

$$F^l(x') = [\underline{f}^l(x'), \overline{f}^l(x')] \equiv [\underline{f}^l, \overline{f}^l] \quad (2-57)$$

$$\underline{f}^l(x') = (\underline{\mu}_{F_1^l}(x_1)) (\underline{\mu}_{F_2^l}(x_2)) \dots (\underline{\mu}_{F_p^l}(x_p)) \quad (2-58)$$

$$\overline{f}^l(x') = (\overline{\mu}_{F_1^l}(x_1)) (\overline{\mu}_{F_2^l}(x_2)) \dots (\overline{\mu}_{F_p^l}(x_p)) \quad (2-59)$$

2.4.4 Reduksi Tipe

Setelah proses inferensi fuzzy, selanjutnya dilakukan reduksi tipe untuk merubah output T2FS dari tipe 2 menjadi tipe 1. Ada beberapa metode reduksi tipe T2FS, antara lain *centroid*, *height* dan *Center of Sets* (COS) (Mendel, 2006). Diantara ketiga metode tersebut, metode COS merupakan metode yang banyak digunakan untuk interval T2FS. Metode COS dirumuskan dengan :

$$Y_{COS} = [y_l, y_r] \quad (2-60)$$

Y_{COS} adalah interval fuzzy tipe 1, sedangkan y_l adalah titik kiri atau nilai minimum y dan y_r adalah titik kanan atau nilai maksimum y . Nilai y_l dan y_r dapat dihitung dengan menggunakan algoritma Karnik-Mendel berikut (Liang, 2000) :

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^L \bar{f}^i y^i + \sum_{i=L+1}^M \underline{f}^i y^i}{\sum_{i=1}^L \bar{f}^i + \sum_{i=L+1}^M \underline{f}^i} \quad (2-61)$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^R \underline{f}^i \bar{y}^i + \sum_{i=R+1}^M \bar{f}^i \bar{y}^i}{\sum_{i=1}^R \underline{f}^i + \sum_{i=R+1}^M \bar{f}^i} \quad (2-62)$$

2.4.5 Defuzzifikasi

Setelah reduksi tipe, selanjutnya dilakukan defuzzifikasi untuk mendapatkan crisp output T2FS. Berdasarkan reduksi tipe COS, output T2FS adalah :

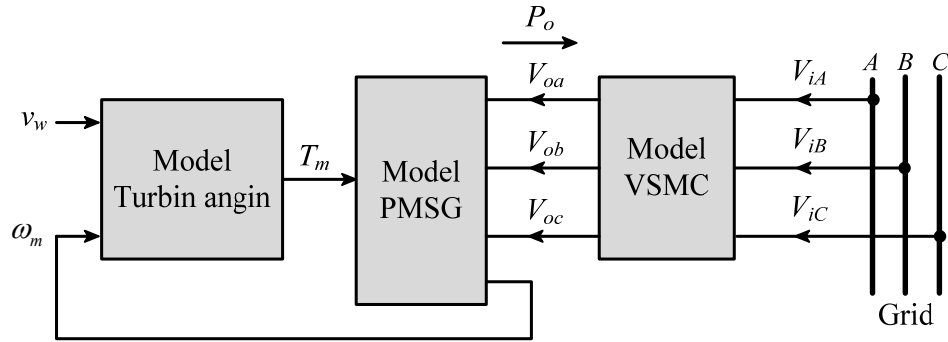
$$y = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (2-63)$$

BAB 3

PEMODELAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN MENGUNAKAN VERY SPARSE MATRIX CONVERTER

Konversi daya pada pembangkit listrik tenaga angin menggunakan tiga komponen utama, yaitu turbin angin, generator dan konverter daya. Turbin angin berfungsi untuk mengubah daya angin menjadi daya mekanik yang akan menggerakkan generator. Generator akan menghasilkan daya listrik berdasarkan daya mekanik turbin angin dan disalurkan ke grid melalui konverter daya. Selain sebagai penyalur daya ke grid, konverter daya juga digunakan sebagai media untuk mengendalikan pembangkit pada sisi generator.

Komponen konversi daya dalam penelitian ini didesain dengan menggunakan turbin angin horizontal, *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) dan *Very Sparse Matrix Converter* (VSMC). Gambar 3.1 menunjukkan skema pembangkit listrik tenaga angin yang diusulkan.



Gambar 3.1 Skema pembangkit listrik tenaga angin menggunakan Very Sparse Matrix Converter (VSMC)

Turbin angin akan menghasilkan torka mekanik T_m untuk menggerakkan generator berdasarkan kecepatan angin dan kecepatan putaran PMSG. PMSG akan menghasilkan daya output P_o untuk disalurkan ke grid melalui VSMC. VSMC akan mengatur kecepatan PMSG untuk mendapatkan daya output maksimum melalui pengaturan tegangan PMSG (V_{oa} , V_{ob} , V_{oc}) dengan suplai tegangan dari grid (V_{ia} , V_{ib} , V_{ic}).

3.1 Model Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin angin yang digunakan adalah turbin angin sumbu horizontal. Model turbin angin terdiri dari dua bagian utama, yaitu model turbin angin dan model drivetrain.

3.1.1 Model Turbin Angin

Model turbin angin dirancang berdasarkan persamaan daya mekanik dengan input kecepatan angin dan kecepatan generator, sedangkan outputnya adalah torka mekanik yang akan menggerakkan generator. Daya angin yang ditangkap turbin angin sumbu horizontal adalah (Manwell, 2005):

$$P_w = 0.5 \rho \pi R^2 v_w^3 \quad (3-1)$$

Daya mekanik yang dihasilkan turbin angin dirumuskan dengan :

$$P_m = P_w C_p(\lambda \beta) \quad (3-2)$$

Karakteristik turbin angin ditentukan oleh parameter koefisien daya $C_p(\lambda \beta)$. Dalam penelitian ini, parameter $C_p(\lambda \beta)$ dirancang menggunakan standar yang dibuat oleh Heier, yang dirumuskan dengan (Heier, 1998) :

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3-3)$$

dengan

$$\lambda = \frac{\omega_w R}{v_w} \quad (3-4)$$

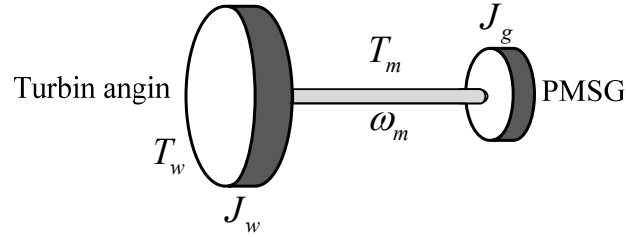
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3-5)$$

Karakteristik koefisien daya ditentukan oleh parameter TSR λ , sudut pitch turbin β dan konstanta $c_1 - c_6$. Pengaturan daya mekanik turbin angin difokuskan pada sisi generator. Dengan demikian sudut pitch turbin angin β dibuat konstan nol. Torka mekanik turbin angin dirumuskan dengan :

$$T_w = \frac{P_m}{\omega_w} \quad (3-6)$$

3.1.2 Model Drivetrain

Generator digerakan oleh turbin angin tanpa menggunakan gearbox. Model drivetrain turbin angin tanpa gearbox yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan model sederhana yang dibuat oleh Popa pada tahun 2011, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.2.

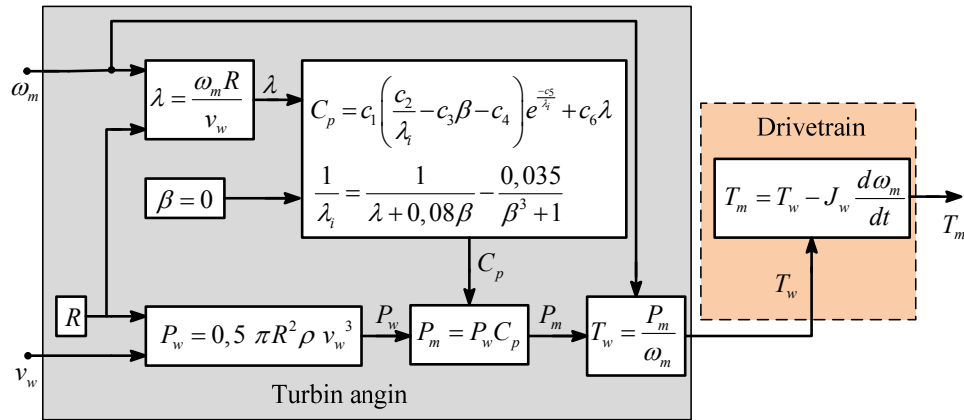


Gambar 3.2 Drivetrain turbin angin

Dalam model ini, konstanta torsi dan koefisien redaman pada poros diabaikan. Berdasarkan Gambar 3.2, torka mekanik yang dihasilkan turbin angin untuk menggerakkan generator dirumuskan dengan (Popa, 2011) :

$$T_m = T_w - J_w \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3-7)$$

Rancangan model turbin angin dan drivetrain secara keseluruhan ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Model turbin angin dan drivetrain

3.2. Model Permanent Magnet Synchronous Generator

Penelitian ini menggunakan generator jenis *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) tipe *Surface Mounted Permanent Magnet* (SPM) dengan kumparan stator terdistribusi, sehingga menghasilkan *back* EMF sinusoidal. Model PMSG terdiri dari model elektrik dan model mekanik.

3.2.1 Model Elektrik PMSG

Model elektrik PMSG mempresentasikan dinamika arus dan daya berdasarkan perubahan tegangan dan torka mekanik sebagai input PMSG. Model PMSG dibuat dalam sumbu dq (*direct-quadrature*) dengan bentuk referensi berputar (*rotating reference frame*). Input model PMSG adalah tegangan output VSMC dalam bentuk sumbu tiga fasa. Untuk mendapatkan tegangan PMSG dalam sumbu dq , maka digunakan transformasi *Park* yang dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

θ_e adalah posisi elektrik rotor. Setelah tegangan dalam sumbu dq diperoleh, selanjutnya dapat dihitung arus stator dalam sumbu dq dengan persamaan berikut :

$$i_d = \int \left(\frac{v_d}{L_d} - \frac{R_s}{L_d} i_d + \omega_e i_q \right) dt \quad (3-9)$$

$$i_q = \int \left(\frac{v_q}{L_q} - \frac{R_s}{L_q} i_q - \omega_e i_d - \omega_e \frac{\psi_m}{L_q} \right) dt \quad (3-10)$$

Torka elektromagnetik PMSG dalam referensi berputar (*rotating reference frame*) dapat dihitung dengan persamaan :

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \left(\psi_m i_q - (L_q - L_d) i_q i_d \right) \quad (3-11)$$

PMSG bentuk SPM memiliki celah udara yang merata, sehingga nilai induktansi kumparan stator L_d dan L_q mendekati sama. Jika $L_d = L_q$, maka Persamaan (3-11) menjadi :

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_m i_q) \quad (3-12)$$

Daya output PMSG dirumuskan dengan :

$$P_o = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (3-13)$$

3.2.2 Model Mekanik PMSG

Model mekanik PMSG mempresentasikan dinamika mekanik PMSG, seperti putaran dan torka mekanik. Parameter ini dipengaruhi oleh koefisien friksi B dan momen inersia J . Dinamika mekanik PMSG dirumuskan dengan :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e - B \omega_m \quad (3-14)$$

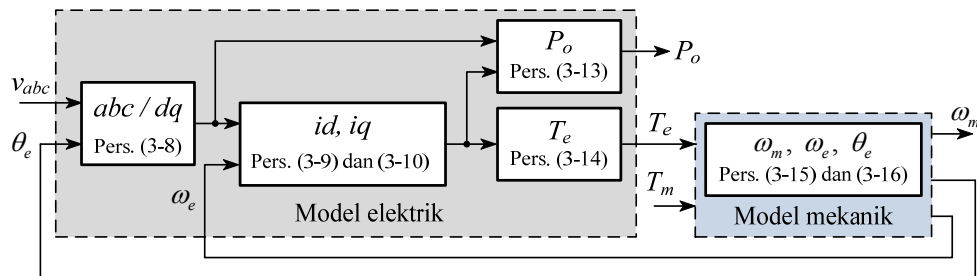
Berdasarkan Persamaan (3-14), dapat dirumuskan kecepatan putaran mekanik ω_m dan posisi rotor θ_r dengan persamaan berikut :

$$\omega_m = \int \left(\frac{T_m - T_e - B\omega_m}{J} \right) dt \quad \text{dan} \quad \theta_r = \int \omega_m dt \quad (3-15)$$

Kecepatan angular ω_e dan posisi elektrik rotor θ_e dirumuskan dengan :

$$\omega_e = n_p \omega_m \quad \text{dan} \quad \theta_e = \int \omega_e dt \quad (3-16)$$

Model PMSG secara keseluruhan ditunjukkan oleh Gambar 3.4



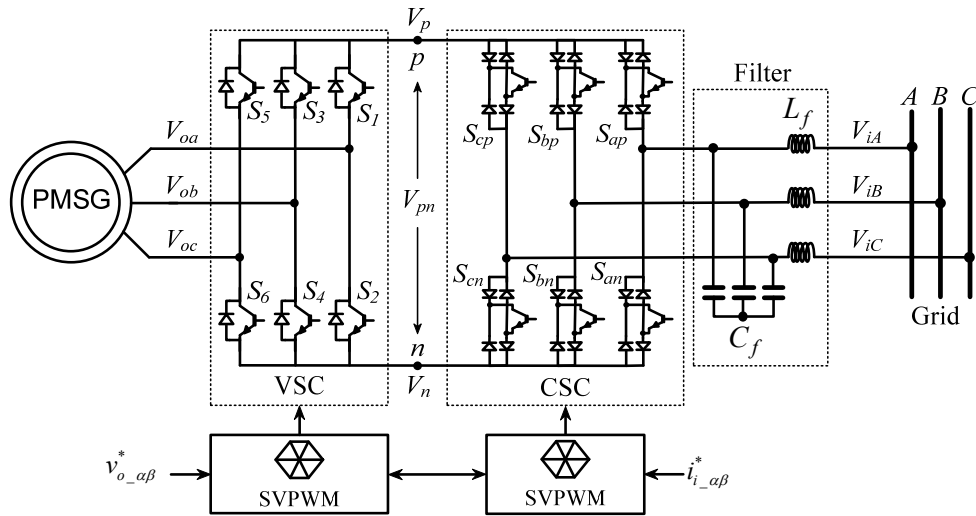
Gambar 3.4 Model PMSG

3.3. Model Very Sparse Matrix Converter

Very Sparse Matrix Converter (VSMC) digunakan sebagai konverter daya yang akan menyalurkan daya listrik dari generator ke grid dan sebagai media untuk mengendalikan kecepatan PMSG.

3.3.1 Struktur Switch VSMC

VSMC terdiri dari dua kelompok konverter, yaitu *Current Source Converter* (CSC) dan *Voltage Source Converter* (VSC). Kelompok CSC terdiri dari enam switch aktif, yaitu S_{ap} , S_{bp} dan S_{cp} sebagai switch pada sisi positif serta S_{an} , S_{bn} dan S_{cn} sebagai switch pada sisi negatif. Setiap switch dilengkapi empat dioda, sehingga memungkinkan arus mengalir dua arah. Kelompok VSC mirip dengan *Voltage Source Inverter* (VSI) konvensional yang terdiri dari enam switch aktif, yaitu S_1 , S_3 , S_5 pada sisi positif dan S_2 , S_4 , S_6 pada sisi negatif. Setiap switch dilengkapi anti parallel dioda. Struktur VSMC ditunjukkan oleh Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Struktur VSMC

Konsep penggunaan VSMC adalah tegangan dan frekuensi harus dapat bervariasi pada sisi PMSG serta konstan pada sisi grid. Di satu sisi tegangan output VSC dalam bentuk stepdown dan tegangan PMSG bervariasi sesuai dengan variasi kecepatan angin. Untuk memenuhi konsep ini, sisi CSC dihubungkan dengan grid dan sisi VSC dihubungkan dengan PMSG. CSC didesain untuk

mentransfer tegangan maksimum ke sisi dc dengan frekuensi konstan pada sisi grid, sedangkan VSC akan menghasilkan tegangan dengan frekuensi bervariasi untuk kendali kecepatan generator. Daya akan mengalir dari generator ke grid dalam bentuk backward. Untuk mengurangi harmonisa akibat frekuensi switching, maka digunakan filter induktor – kapasitor (LC) ukuran kecil pada sisi grid.

Berdasarkan Gambar 3.5 dan matrik struktur switch VSMC pada Persamaan (2-8), maka dapat dirumuskan persamaan tegangan output VSMC sebagai berikut :

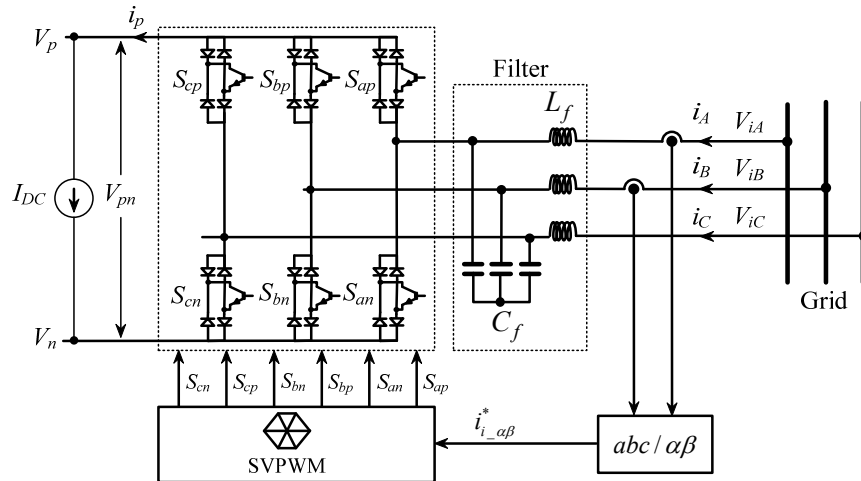
$$V_o = T_{VSC} T_{CSC} V_i \quad (3-17)$$

$$\begin{bmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \\ S_5 & S_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{ap} & S_{bp} & S_{cp} \\ S_{an} & S_{bn} & S_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{iA} \\ V_{iB} \\ V_{iC} \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

T_{VSC} adalah matrik switch VSC, T_{CSC} adalah matrik switch CSC, $[V_{oa}; V_{ob}; V_{oc}]$ adalah tegangan VSC dan $[V_{iA}; V_{iB}; V_{iC}]$ adalah tegangan grid.

3.3.2 Model Current Source Converter

Fungsi *Current Source Converter* (CSC) adalah untuk mentransfer tegangan ac dari grid menjadi tegangan dc. Dalam merancang teknik modulasi, CSC dapat diasumsikan sebagai penyearah sumber arus stand alone (Kolar, 2007). Gambar 3.6 menunjukkan skema CSC sebagai penyearah sumber arus.



Gambar 3.6 Skema CSC sebagai penyearah sumber arus stand alone

Modulasi CSC didesain untuk mendapatkan nilai maksimum tegangan dc (V_{pn}). Berdasarkan struktur switch CSC pada Gambar 3.6, tegangan dc dari output CSC dapat dirumuskan dengan :

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ap} & S_{bp} & S_{cp} \\ S_{an} & S_{bn} & S_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{iA} \\ V_{iB} \\ V_{iC} \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

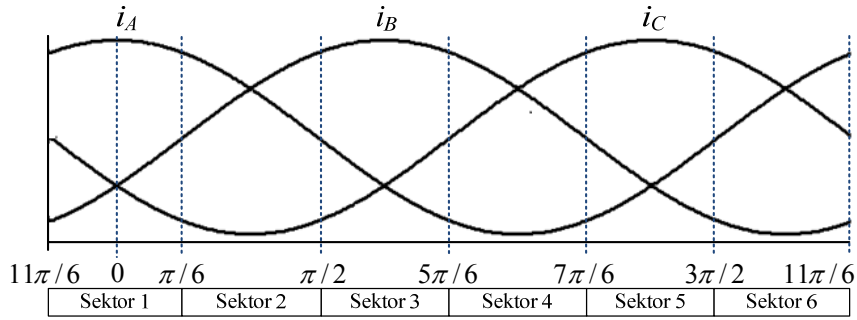
$$V_{pn} = V_p - V_n \quad (3-20)$$

Sebagai penyearah sumber arus, hanya dua switch CSC yang aktif pada setiap status switching, yaitu satu switch positif S_{xp} dan satu switch negatif S_{xn} dengan $x \in \{a, b, c\}$ (Kolar, 2007). Berdasarkan ketentuan ini, terdapat sembilan kombinasi status switching, seperti yang diuraikan dalam Tabel 3.1. Enam kombinasi merupakan status aktif sedangkan tiga lagi status nol atau disebut juga status switching pada vektor nol.

Tabel 3.1 Status switching CSC

Status Switch						Tegangan Output		
S_{ap}	S_{bp}	S_{cp}	S_{an}	S_{bn}	S_{cn}	V_p	V_n	V_{pn}
1	0	0	0	0	1	V_A	V_C	V_{AC}
0	1	0	0	0	1	V_B	V_C	V_{BC}
0	1	0	1	0	0	V_B	V_A	V_{BA}
0	0	1	1	0	0	V_C	V_A	V_{CA}
0	0	1	0	1	0	V_C	V_B	V_{CB}
1	0	0	0	1	0	V_A	V_B	V_{AB}
1	0	0	1	0	0	V_A	V_A	0
0	1	0	0	1	0	V_B	V_B	0
0	0	1	0	0	1	V_C	V_C	0

Modulasi CSC umumnya menggunakan teknik *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM) dengan referensi vektor arus input I_i . Karena sudut fasa didesain sama dengan nol, maka referensi modulasi CSC juga dapat menggunakan vektor tegangan input (Wang, 2006). Dalam penelitian ini, switch CSC dimodulasi berdasarkan vektor arus input. Dalam merancang teknik modulasi CSC, arus input diasumsikan dalam kondisi seimbang seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Arus input CSC

Arus input dalam kondisi seimbang, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.7 dapat dipresentasikan dengan :

$$\begin{aligned} i_A &= i_m \cos(\omega_i t) \\ i_B &= i_m \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \\ i_C &= i_m \cos(\omega_i t - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (3-21)$$

Vektor arus input I_i dapat diekspresikan dengan :

$$I_i = I_m \angle \theta_i = d_{\alpha i} i_\alpha + d_{\beta i} i_\beta \quad (3-22)$$

I_m dan θ_i adalah magnitudo dan sudut vektor arus input. $d_{\alpha i}$ dan $d_{\beta i}$ adalah duty cycle dalam sumbu $\alpha\beta$, sedangkan i_α dan i_β adalah arus input dalam sumbu $\alpha\beta$. i_α dan i_β diperoleh dengan menggunakan transformasi Clarke berikut :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

Dari Persamaan (3-23) diperoleh magnitudo dan sudut vektor arus input dengan persamaan :

$$I_m = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad \text{dan} \quad \theta_i = \text{atan} \left(\frac{i_\beta}{i_\alpha} \right) \quad (3-24)$$

Duty cycle dalam sumbu $\alpha\beta$ dirumuskan dengan :

$$\begin{aligned} d_{\alpha i} &= m_i \sin \left(\frac{\pi}{3} - \theta_i \right) \\ d_{\beta i} &= m_i \sin \theta_i \end{aligned} \quad \text{dan} \quad d_0 = 1 - d_{\alpha i} - d_{\beta i} \quad (3-25)$$

dengan

$$m_i = I_m / i_p, \quad 0 < m_i \leq 1 \quad (3-26)$$

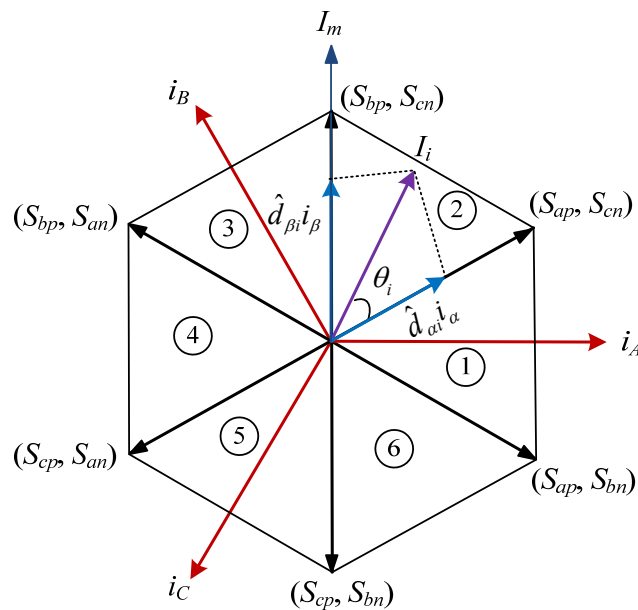
m_i dan i_p adalah indeks modulasi CSC dan arus dc pada lengan positif CSC. Untuk mengurangi rugi daya karena switching, maka perioda switching direduksi dengan menghilangkan vektor nol, maka duty cycle CSC dihitung ulang dengan persamaan :

$$\begin{aligned} \hat{d}_{ai} &= \frac{d_{ai}}{d_{ai} + d_{\beta i}} \quad \text{dan} \quad \hat{d}_{ai} + \hat{d}_{\beta i} = 1 \\ \hat{d}_{\beta i} &= \frac{d_{\beta i}}{d_{ai} + d_{\beta i}} \end{aligned} \quad (3-27)$$

Dengan menggunakan duty cycle pada Persamaan (3-27), dapat dihitung tegangan output CSC dengan persamaan berikut :

$$V_{pn} = \hat{d}_{ai} V_{ai} + \hat{d}_{\beta i} V_{\beta i} = 1.5 V_{i_max} \quad (3-28)$$

Untuk memudahkan penentuan status switching, maka vektor arus input dibagi menjadi enam sektor berdasarkan sudut vektor, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.7. Status switch pada setiap sektor ditunjukkan oleh Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Vektor arus input dan status switch pada setiap sektor.

Setiap sektor vektor arus input dibatasi oleh sudut yang nilainya diekspresikan dengan persamaan berikut :

$$\text{Sektor CSC} = \begin{cases} 1 \rightarrow \frac{11\pi}{6} \leq \theta_i < \frac{\pi}{6} \\ 2 \rightarrow \frac{\pi}{6} \leq \theta_i < \frac{\pi}{2} \\ 3 \rightarrow \frac{\pi}{2} \leq \theta_i < \frac{5\pi}{6} \\ 4 \rightarrow \frac{5\pi}{6} \leq \theta_i < \frac{7\pi}{6} \\ 5 \rightarrow \frac{7\pi}{6} \leq \theta_i < \frac{3\pi}{2} \\ 6 \rightarrow \frac{3\pi}{2} \leq \theta_i < \frac{11\pi}{6} \end{cases} \quad (3-29)$$

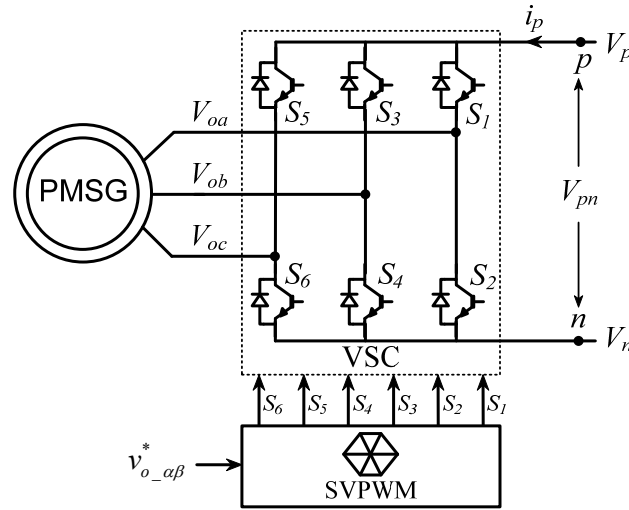
Berdasarkan Gambar 3.7, Gambar 3.8 dan Tabel 3.1, maka dapat ditentukan switch yang aktif pada setiap sektor serta tegangan outputnya seperti yang diuraikan dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Switch yang aktif pada setiap sektor

Sektor	Duty Cycle	Switch						Tegangan Output			Arus Input		
		S_{ap}	S_{bp}	S_{cp}	S_{an}	S_{bn}	S_{cn}	V_p	V_n	V_{pn}	i_A	i_B	i_C
1	$\hat{d}_{\alpha i}$	1	0	0	0	1	0	V_A	V_B	V_{AB}	i_p	$-i_p$	0
	$\hat{d}_{\beta i}$	1	0	0	0	0	1	V_A	V_C	V_{AC}	i_p	0	$-i_p$
2	$\hat{d}_{\alpha i}$	1	0	0	0	0	1	V_A	V_C	V_{AC}	i_p	0	$-i_p$
	$\hat{d}_{\beta i}$	0	1	0	0	0	1	V_B	V_C	V_{BC}	0	i_p	$-i_p$
3	$\hat{d}_{\alpha i}$	0	1	0	0	0	1	V_B	V_C	V_{BC}	0	i_p	$-i_p$
	$\hat{d}_{\beta i}$	0	1	0	1	0	0	V_B	V_A	V_{BA}	$-i_p$	i_p	0
4	$\hat{d}_{\alpha i}$	0	1	0	1	0	0	V_B	V_A	V_{BA}	$-i_p$	i_p	0
	$\hat{d}_{\beta i}$	0	0	1	1	0	0	V_C	V_A	V_{CA}	$-i_p$	0	i_p
5	$\hat{d}_{\alpha i}$	0	0	1	1	0	0	V_C	V_A	V_{CA}	$-i_p$	0	i_p
	$\hat{d}_{\beta i}$	0	0	1	0	1	0	V_C	V_B	V_{CB}	0	$-i_p$	i_p
6	$\hat{d}_{\alpha i}$	0	0	1	0	1	0	V_C	V_B	V_{CB}	0	$-i_p$	i_p
	$\hat{d}_{\beta i}$	1	0	0	0	1	0	V_A	V_B	V_{AB}	i_p	$-i_p$	0

3.3.3 Model Voltage Source Converter

Fungsi *Voltage Source Converter* (VSC) untuk mengubah tegangan dc dari output CSC menjadi tegangan ac dengan magitudo dan frekuensi yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan untuk kendali kecepatan generator. Dalam mendesain modulasinya, VSC dapat diasumsikan sebagai inverter stand alone dengan sumber tegangan V_{pn} , seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Voltage source converter stand alone

Berdasarkan struktur switch pada Gambar 3.9, tegangan output VSC dapat dipresentasikan dengan :

$$\begin{bmatrix} V_{oa} \\ V_{ob} \\ V_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_4 & S_6 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} V_p \\ V_n \end{bmatrix} \quad \text{dan} \quad V_{pn} = V_n - V_n \quad (3-30)$$

Prinsip dasar modulasi VSC adalah hanya satu switch yang konduksi pada setiap fasa. Jika switch S_1 konduksi, maka switch S_2 tidak konduksi. Berdasarkan prinsip ini, cukup status switch positif saja yang diperhitungkan, sedangkan status switch negatif merupakan kebalikan dari status switch positif. Berdasarkan jumlah switch positif, maka terdapat delapan kombinasi status switch VSC, seperti yang diuraikan dalam Tabel 3.3. Enam kombinasi merupakan status aktif sedangkan dua kombinasi merupakan status nol.

Tabel 3.3 Status switch dan tegangan output VSC

Status Switch						Tegangan Output		
Switch Positif			Switch Negatif					
S_1	S_3	S_5	S_2	S_4	S_6	V_{oa}	V_{ob}	V_{oc}
1	0	0	0	1	1	$(2/3)V_{pn}$	$-(1/3)V_{pn}$	$-(1/3)V_{pn}$
1	1	0	0	0	1	$(1/3)V_{pn}$	$(1/3)V_{pn}$	$-(2/3)V_{pn}$
0	1	0	1	0	1	$-(1/3)V_{pn}$	$(2/3)V_{pn}$	$-(1/3)V_{pn}$
0	1	1	1	0	0	$-(2/3)V_{pn}$	$(1/3)V_{pn}$	$(1/3)V_{pn}$
0	0	1	1	1	0	$-(1/3)V_{pn}$	$-(1/3)V_{pn}$	$(2/3)V_{pn}$
1	0	1	0	1	0	$(1/3)V_{pn}$	$-(2/3)V_{pn}$	$(1/3)V_{pn}$
1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	1	0	0	0

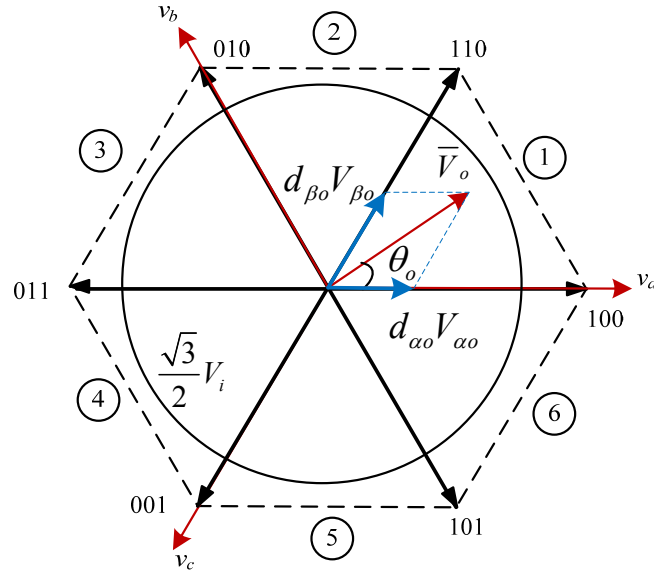
Jika yang diperhitungkan hanya switch positif, maka tegangan output VSC pada masing-masing fasa dapat dipresentasikan dengan :

$$\begin{cases} V_{oa} = V_{pn} \left(\frac{2}{3}S_1 - \frac{1}{3}S_3 - \frac{1}{3}S_5 \right) \\ V_{ob} = V_{pn} \left(\frac{2}{3}S_3 - \frac{1}{3}S_1 - \frac{1}{3}S_5 \right) \\ V_{oc} = V_{pn} \left(\frac{2}{3}S_5 - \frac{1}{3}S_1 - \frac{1}{3}S_3 \right) \end{cases} \quad (3-31)$$

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk modulasi VSC. Salah satunya adalah metode SVPWM. Dalam metode ini Switch VSC dimodulasi berdasarkan vektor tegangan output, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.10.

Vektor tegangan output \bar{V}_o ditentukan oleh tegangan referensi V_{ao} dan $V_{\beta o}$ yang diperoleh dari output controller kecepatan. Dari tegangan referensi V_{ao} dan $V_{\beta o}$ dapat dihitung magnitudo V_{om} dan sudut vektor tegangan θ_o dengan persamaan :

$$V_{om} = \sqrt{V_{ao}^2 + V_{\beta o}^2} \quad \text{dan} \quad \theta_o = \tan^{-1} \frac{V_{\beta o}}{V_{ao}} \quad (3-32)$$



Gambar 3.10 Vektor tegangan output

Berdasarkan Gambar 3.10, vektor tegangan output \bar{V}_o dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$\bar{V}_o = d_{\alpha o} V_{\alpha o} + d_{\beta o} V_{\beta o} \quad (3-33)$$

$d_{\alpha o}$ dan $d_{\beta o}$ adalah duty cycle switch VSC dalam sumbu $\alpha\beta$. Duty cycle dapat dihitung dengan persamaan :

$$\begin{aligned} d_{\alpha o} &= m_o \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_o\right) \\ d_{\beta o} &= m_o \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad \text{dan} \quad d_{0o} = 1 - d_{\alpha o} - d_{\beta o} \quad (3-34)$$

dengan

$$m_o = \frac{\sqrt{3} V_{om}}{V_{pn}}, \quad 0 \leq m_o \leq 1 \quad (3-35)$$

m_o adalah indeks modulasi VSC. Untuk memudahkan penentuan switch yang aktif, maka vektor tegangan output dibagi menjadi enam sektor, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.10. Setiap sektor dibatasi oleh sudut vektor tegangan, seperti yang diekspresikan pada persamaan berikut :

$$\text{Sektor VSC} = \begin{cases} 1 & \rightarrow & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \\ 2 & \rightarrow & \frac{\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ 3 & \rightarrow & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ 4 & \rightarrow & \pi \leq \theta \leq \frac{4\pi}{3} \\ 5 & \rightarrow & \frac{4\pi}{3} \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ 6 & \rightarrow & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (3-36)$$

3.3.4 Koordinasi Switching CSC dengan VSC

Salah satu fitur VSMC adalah tidak memiliki dc link atau penyimpan energi antara VSC dengan CSC. Antara VSC dan CSC terhubung secara langsung. Oleh sebab itu, faktor penting yang perlu diperhatikan dalam mendesain teknik modulasi VSMC adalah menghindari terjadinya hubung singkat antara switch CSC dengan switch VSC pada waktu switching. Supaya tidak terjadi hubung singkat, status switch CSC harus dikoordinasikan dengan status switch VSC. Hal ini dapat dilakukan dengan mendesain komutasi switch CSC dengan metode arus dc link nol. Dalam metode ini, pergantian status switching CSC dilakukan ketika switch VSC dalam kondisi free-wheel atau pada saat status switching VSC pada vektor nol. Selain itu frekuensi switching VSC dibuat dua kali frekuensi switching CSC (Schafmeister, 2008).

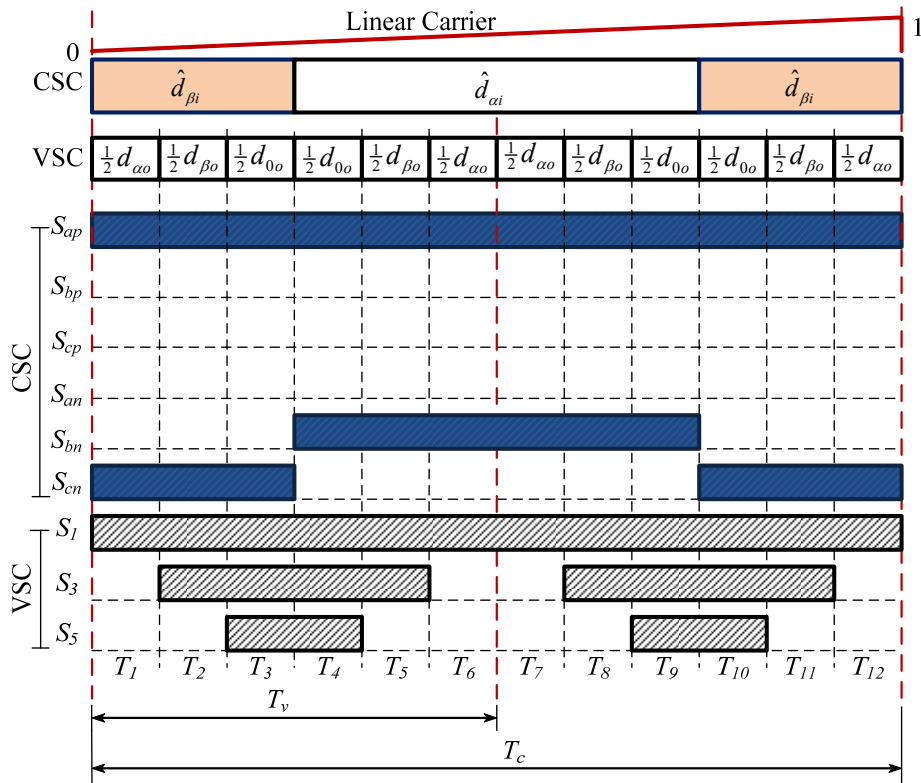
Gambar 3.11 menunjukkan koordinasi switch CSC dengan VSC pada sektor 1. Periode switching CSC adalah T_c dan periode switching VSC adalah T_v . Switch VSC akan free-wheel ketika ketiga switch S_1 , S_3 dan S_5 dalam kondisi konduksi (status 1) atau ketiganya dalam kondisi terputus (status 0), seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.11. Switch CSC yang aktif pada sektor 1 adalah S_{ap} , S_{an} dan S_{bn} . Hanya dua switch yang konduksi pada setiap status switching, yakni S_{ap} dengan S_{an} atau S_{ap} dengan S_{bn} . Switch S_{ap} konduksi selama satu periode, sedangkan S_{an} dan S_{bn} konduksi secara bergantian. Pergantian waktu konduksi S_{an} dan S_{bn} terjadi saat ketiga switch S_1 , S_3 dan S_5 dalam kondisi free-wheel.

Koordinasi antara switch CSC dengan switch VSC didesain dengan cara menghitung ulang duty cycle kedua konverter melalui Persamaan (3-37) dan membagi waktu switching menjadi dua belas bagian, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.11.

$$\begin{cases} T_1 = T_{12} = 0.5 \hat{d}_{\beta i} d_{\alpha o} \\ T_2 = T_{11} = 0.5 \hat{d}_{\beta i} d_{\beta o} \\ T_3 = T_{10} = 0.5 \hat{d}_{\beta i} d_{0o} \\ T_4 = T_9 = 0.5 \hat{d}_{\alpha i} d_{0o} \\ T_5 = T_8 = 0.5 \hat{d}_{\alpha i} d_{\beta o} \\ T_6 = T_7 = 0.5 \hat{d}_{\alpha i} d_{\alpha o} \end{cases} \quad (3-37)$$

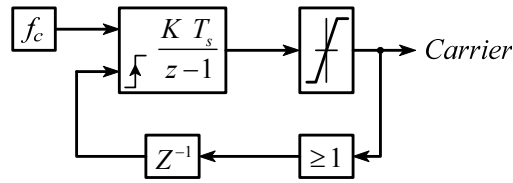
dengan

$$T_c = T_1 + T_2 + \dots + T_{12} = 1 \text{ dan } T_v = 0.5 T_c \quad (3-38)$$



Gambar 3.11 Koordinasi switch CSC dan VSC pada sektor 1

Gambar 3.11 adalah contoh koodinasi switch CSC dengan switch VSC pada sektor 1. Pulsa modulasi setiap switch diperoleh dengan cara membandingkan waktu switching dengan pulsa carrier. Pulsa carrier didesain dalam bentuk sinyal linear yang berubah dari nol ke satu dengan step T_s , seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.11. Proses ini berulang sebanyak frekuensi switching CSC (f_c) dalam satu perioda. Gambar 3.12 menunjukkan model pulsa carrier VSMC



Gambar 3.12 Pulsa carrier

Switch akan konduksi atau pulsa modulasi akan bernilai 1 jika pulsa carrier lebih besar dari waktu switching. Berdasarkan status switch CSC dalam Tabel 3.2 dan dengan menggunakan Persamaan (3-37), maka dapat ditentukan pulsa modulasi switch CSC pada setiap sektor dengan persamaan berikut :

$$\text{Sektor 1} \begin{cases} S_{ap} = 1 \\ S_{bn} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{cn} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) > \text{carrier} > (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{bp} = S_{cp} = S_{an} = 0 \end{cases} \quad (3-39)$$

$$\text{Sektor 2} \begin{cases} S_{cn} = 1 \\ S_{ap} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{bp} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) > \text{carrier} > (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{cp} = S_{an} = S_{bn} = 0 \end{cases} \quad (3-40)$$

$$\text{Sektor 3} \begin{cases} S_{bp} = 1 \\ S_{cn} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{an} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) > \text{carrier} > (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{ap} = S_{cp} = S_{bn} = 0 \end{cases} \quad (3-41)$$

$$\text{Sektor 4} \begin{cases} S_{an} = 1 \\ S_{bp} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{cp} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) > \text{carrier} > (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{ap} = S_{bn} = S_{cn} = 0 \end{cases} \quad (3-42)$$

$$\text{Sektor 5} \begin{cases} S_{cp} = 1 \\ S_{an} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{bn} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) > \text{carrier} > (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{ap} = S_{bp} = S_{cn} = 0 \end{cases} \quad (3-43)$$

$$\text{Sektor 6} \begin{cases} S_{bn} = 1 \\ S_{cp} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{ap} = 1 \rightarrow (T_1 + T_2 + T_3) > \text{carrier} > (T_1 + T_2 + \dots + T_9) \\ S_{bp} = S_{an} = S_{cn} = 0 \end{cases} \quad (3-44)$$

Dalam menentukan pulsa modulasi switch VSC cukup status switch positif (S_1, S_3, S_5) saja yang diperhitungkan, sedangkan status switch negatif (S_2, S_4, S_6) merupakan kebalikan dari status switch positifnya. Pulsa modulasi switch negatif VSC dapat dinyatakan dengan :

$$\begin{cases} S_2 \sim S_1 \\ S_4 \sim S_3 \\ S_6 \sim S_5 \end{cases} \quad (3-45)$$

Pulsa modulasi switch positif VSC berdasarkan Gambar 3.10 dan Persamaan (3-37) dapat dipresentasikan dengan :

$$\text{Sektor 1} \begin{cases} S_1 = 1 \\ S_3 = 1 \rightarrow T_1 \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_5) \vee (T_1 + \dots + T_7) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{11}) \\ S_5 = 1 \rightarrow (T_1 + T_2) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_4) \vee (T_1 + \dots + T_8) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{10}) \end{cases} \quad (3-46)$$

$$\text{Sektor 2} \begin{cases} S_1 = 1 \rightarrow T_1 \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_5) \vee (T_1 + \dots + T_7) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{11}) \\ S_3 = 1 \\ S_5 = 1 \rightarrow (T_1 + T_2) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_4) \vee (T_1 + \dots + T_8) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{10}) \end{cases} \quad (3-48)$$

$$\text{Sektor 3} \begin{cases} S_1 = 1 \rightarrow (T_1 + T_2) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_4) \vee (T_1 + \dots + T_8) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{10}) \\ S_3 = 1 \\ S_5 = 1 \rightarrow T_1 \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_5) \vee (T_1 + \dots + T_7) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{11}) \end{cases} \quad (3-49)$$

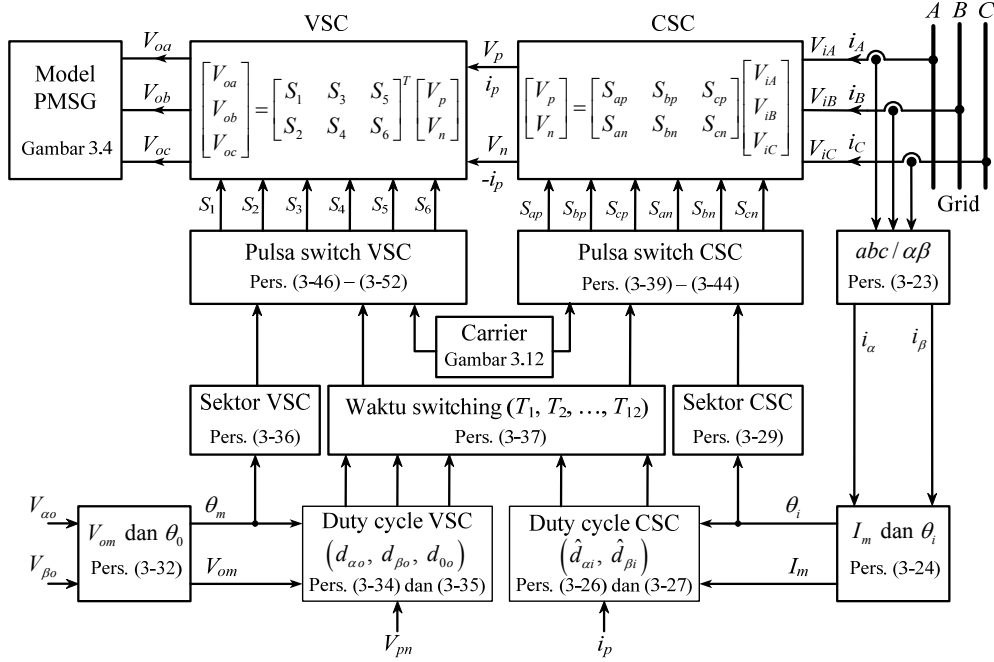
$$\text{Sektor 4} \begin{cases} S_1 = 1 \rightarrow (T_1 + T_2) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_4) \vee (T_1 + \dots + T_8) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{10}) \\ S_3 = 1 \rightarrow T_1 \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_5) \vee (T_1 + \dots + T_7) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{11}) \\ S_5 = 1 \end{cases} \quad (3-50)$$

$$\text{Sektor 5} \begin{cases} S_1 = 1 \rightarrow T_1 \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_5) \vee (T_1 + \dots + T_7) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{11}) \\ S_3 = 1 \rightarrow (T_1 + T_2) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_4) \vee (T_1 + \dots + T_8) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{10}) \\ S_5 = 1 \end{cases} \quad (3-51)$$

$$\text{Sektor 6} \begin{cases} S_1 = 1 \\ S_3 = 1 \rightarrow (T_1 + T_2) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_4) \vee (T_1 + \dots + T_8) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{10}) \\ S_5 = 1 \rightarrow T_1 \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_5) \vee (T_1 + \dots + T_7) \leq \text{carrier} \leq (T_1 + \dots + T_{11}) \end{cases} \quad (3-52)$$

Jika model CSC dan VSC yang telah diuraikan di atas digabungkan, maka diperoleh model VSMC seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.13. CSC akan mengkonversikan tegangan input (V_{iA} , V_{iB} , V_{iC}) menjadi tegangan V_{pn} dengan referensi modulasi vektor arus input (i_A , i_B , i_C). VSC akan mengkonversikan tegangan V_{pn} menjadi tegangan output VSC (V_{oa} , V_{ob} , V_{oc}) dengan frekuensi yang bervariasi sesuai dengan tegangan referensi (V_{ao} dan $V_{\beta o}$) yang dihasilkan oleh controller kecepatan PMSG. Untuk mendapatkan tegangan output VSC agar sesuai dengan tegangan referensi, maka switch VSC dimodulasi berdasarkan vektor tegangan referensi (V_{ao} dan $V_{\beta o}$).

Untuk menghindari terjadinya hubung singkat antara switch CSC dengan switch VSC, maka dilakukan penghitungan ulang waktu switching masing-masing konverter dengan mengalikan kedua duty cycle switch konverter tersebut, seperti yang diekspresikan dalam Persamaan (3-37). Pulsa modulasi masing-masing switch konverter diperoleh dengan membandingkan waktu switching dengan pulsa carrier, dimana switch akan konduksi jika pulsa carrier lebih besar dari waktu switching, seperti yang diekspresikan oleh Persamaan (3-39) –(3-52).



Gambar 3.13 Model VSMC

3.3.5 Desain Filter LC

Sama halnya dengan konverter lain, frekuensi switching pada VSMC akan menimbulkan harmonisa pada sisi input. Untuk mengatasi hal ini, digunakan lowpass filter menggunakan kapasitor dan induktor (LC), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.5. Kapasitor C_f dipasang parallel dengan line input dalam bentuk hubungan bintang dan Induktor L_f dipasang seri dengan line input. Prinsip kerja dari lowpass filter LC ini adalah hanya meloloskan sinyal frekuensi rendah dan meredam sinyal frekuensi tinggi akibat frekuensi switching (Schafmeister, 2008). Oleh sebab itu, frekuensi *cutoff* filter harus lebih rendah dari frekuensi switching. Nilai frekuensi *cutoff* filter ditentukan oleh ukuran kapasitor dan induktor, yang dirumuskan dengan :

$$f_{cutoff} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (3-53)$$

Faktor penting yang perlu diperhatikan dalam menentukan ukuran kapasitor dan induktor adalah : 1) Penambahan daya reaktif akibat penggunaan

kapasitor harus diminimalisir sekecil mungkin dan 2) drop tegangan akibat penggunaan induktor juga harus diminimalkan (Kolar, 2007). Kapasitas kapasitor ditentukan dengan persamaan (Schafmeister, 2008) :

$$C_f = \frac{P_o \tan \phi_i}{3 V_i^2 2\pi f_i} \quad (3-54)$$

P_o adalah rating daya output konverter, V_i adalah magnitudo tegangan input dan ϕ_i adalah sudut fasa input. Setelah nilai C_f diperoleh, maka nilai L_f dapat dihitung dengan Persamaan (3-53). Agar drop tegangan akibat induktor dapat diminimalisir, maka ukuran induktor harus memenuhi ketentuan berikut :

$$L_f \leq \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta V_L}{V_i}\right)^2 - 2\left(\frac{\Delta V_L}{V_i}\right)} V_i}{2\pi f_i I_i} \quad (3-55)$$

ΔV_L adalah drop tegangan maksimum pada filter inductor. V_i dan I_i adalah rating tegangan dan arus input konverter.

3.3.6 Rugi Daya VSMC

Efisiensi konverter dipengaruhi oleh rugi daya pada komponen yang digunakan. Ada dua komponen switch yang digunakan pada VSMC, yaitu IGBT dan dioda. Ada beberapa jenis rugi daya pada IGBT dan diode, antara lain rugi daya pada waktu konduksi, rugi daya waktu tidak konduksi dan rugi daya waktu peralihan status switching. Rugi daya rugi daya waktu tidak konduksi dan rugi daya waktu peralihan status switching dapat diabaikan karena nilainya kecil.

Rugi daya IGBT saat konduksi dipengaruhi oleh drop tegangan forward antara emitor dan kolektro v_{ce_sat} , arus yang melewati kolektor i_c dan resistansi waktu konduksi R_{ce} . Rugi daya IGBT waktu konduksi dirumuskan dengan :

$$P_{loss_igbt} = i_c (v_{ce_sat} + R_{ce} i_c) \quad (3-56)$$

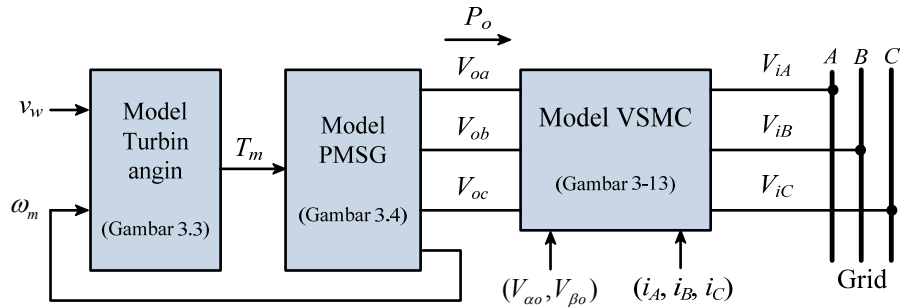
Sedangkan rugi daya dioda waktu konduksi dirumuskan dengan :

$$P_{loss_d} = i_f (v_{f0} + R_f i_f) \quad (3-57)$$

Dimana i_f adalah arus forward, R_f adalah resistansi waktu konduksi dan v_{f0} adalah drop tegangan forward.

3.4 Model Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan VSMC

Model pembangkit listrik tenaga angin dengan konverter VSMC secara garis besar terdiri dari model turbin angin horizontal, model PMSG dan model VSMC, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.14. Model turbin angin dirancang untuk mendapatkan torka mekanik T_m untuk menggerakkan PMSG. Input model turbin angin adalah kecepatan angin v_w dan kecepatan ω_m . Detail model turbin angin ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.14 Model Pembangkit listrik tenaga angin menggunakan VSMC

PMSG akan menghasilkan daya listrik P_o berdasarkan torka mekanik turbin angin dan disalurkan ke grid melalui VSMC dalam bentuk backward. Model PMSG dirancang dalam sumbu dq dengan input torka mekanik turbin angin dan tegangan output VSMC (V_{oa} , V_{ob} , V_{oc}).

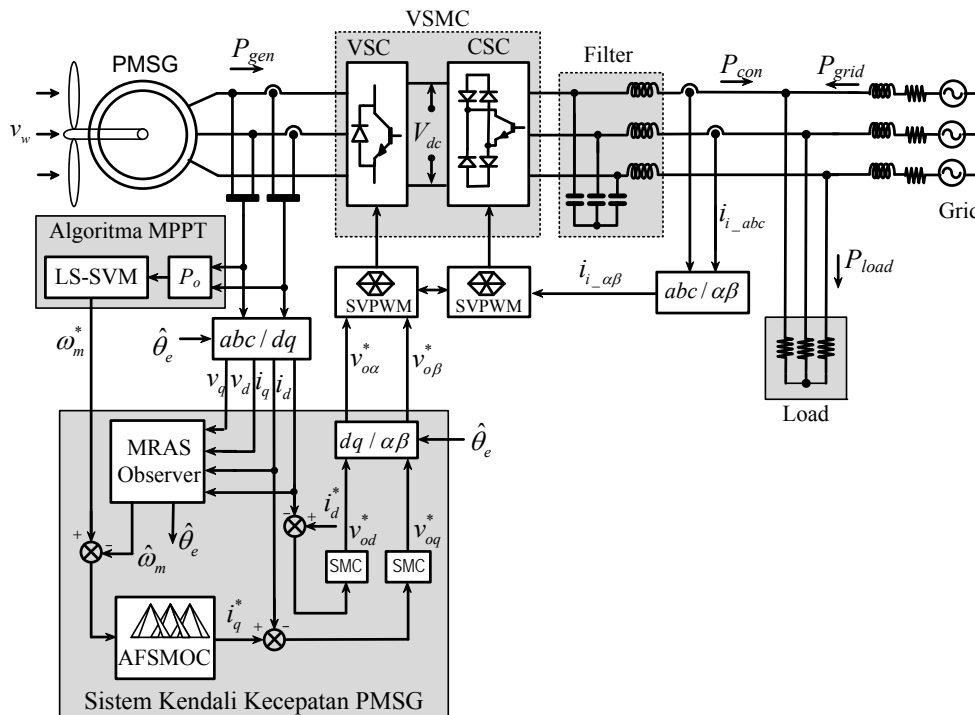
VSMC digunakan untuk menyalurkan daya listrik dari PMSG ke grid dan sebagai media pengendali kecepatan PMSG untuk mendapatkan daya output maksimum pada setiap variasi kecepatan angin. Kecepatan PMSG dikendalikan dengan cara mengatur frekuensi tegangan stator (V_{oa} , V_{ob} , V_{oc}) melalui VSMC. Model VSMC terdiri dari CSC dan VSC, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.13. Bagian CSC dihubungkan dengan grid sedangkan bagian VSC dihubungkan dengan PMSG. VSC akan menghasilkan tegangan output (V_{oa} , V_{ob} , V_{oc}) dengan suplai tegangan dc dari CSC (V_{pn}). Untuk mendapatkan tegangan yang sesuai dengan kebutuhan kendali kecepatan PMSG, maka switch VSC dimodulasi berdasarkan vektor tegangan referensi (V_{ao} dan $V_{\beta o}$) yang diperoleh dari controller kecepatan PMSG. Bagian CSC akan menghasilkan tegangan dc (V_{pn}) berdasarkan vektor arus input (i_A , i_B , i_C) dengan suplai tegangan grid (V_{iA} , V_{iB} , V_{iC}).

BAB 4

DESAIN KENDALI KECEPATAN DAN ALGORITMA MPPT BERBASIS KECERDASAN BUATAN

Sistem kendali kecepatan PMSG dan algoritma MPPT dirancang untuk mengendalikan daya output generator agar maksimum pada setiap variasi kecepatan angin. Konsep ini disebut juga *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Sistem kendali MPPT dirancang berdasarkan karakteristik daya mekanik turbin angin, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.8. Daya maksimum dapat diperoleh dengan mengendalikan kecepatan generator pada titik daya maksimum.

Secara umum, sistem kendali MPPT terdiri atas algoritma MPPT dan sistem kendali kecepatan generator. Algoritma MPPT berfungsi untuk mencari kecepatan referensi generator pada titik daya maksimum, sedangkan sistem kendali kecepatan berfungsi untuk mengendalikan kecepatan generator agar sesuai dengan kecepatan referensi pada titik daya maksimum. Skema sistem kendali MPPT yang diusulkan diilustrasikan oleh Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Skema sistem kendali MPPT

4.1 Desain Sistem Kendali Kecepatan PMSG

Untuk mendapatkan daya maksimum, kecepatan PMSG harus dikendalikan titik koefisien daya maksimum, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8. Sistem kendali kecepatan dirancang menggunakan metode sensorless FOC, yang terdiri dari kontroler kecepatan, observer kecepatan dan regulator arus, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1. Kontroler kecepatan berfungsi untuk mengendalikan arus stator sumbu q . Observer kecepatan berfungsi sebagai pengganti sensor kecepatan untuk menentukan nilai kecepatan terukur, sedangkan regulator arus digunakan untuk mentransformasikan parameter arus dari kontroler kecepatan menjadi parameter tegangan untuk modulasi VSMC.

4.1.1 Kontroler Kecepatan PMSG

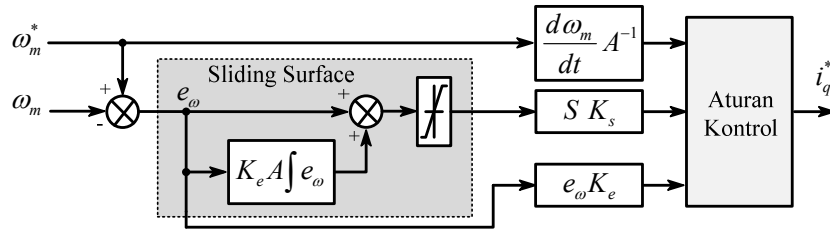
Kontroler kecepatan dengan metode sensorless FOC dirancang dengan skema sudut torka konstan. Dalam metode ini, kecepatan PMSG dikendalikan dengan mengatur torka secara tidak langsung melalui arus stator sumbu q (i_q^*), sedangkan arus stator sumbu d (i_d^*) dibuat nol. Hubungan torka dan arus stator i_q^* dipresentasikan oleh persamaan berikut :

$$T_e = 1.5 n_p \psi_m i_q^* \quad (4-1)$$

Pengaturan arus stator i_q^* dirancang menggunakan *Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control* (AFSMOC). Metode ini merupakan pengembangan dari Sliding Mode Control (SMC) konvensional. AFSMOC dirancang untuk meningkatkan ketahanan SMC dengan merancang penguat adaptif pada sliding surface menggunakan fuzzy type-2 system (T2FS).

4.1.1.1 Sliding Mode Controller

Sliding Mode Control (SMC) adalah salah satu metode kendali berdasarkan struktur yang terdiri dari bagian sliding surface dan bagian aturan kontrol (Yu, 2009). Struktur SMC untuk kendali kecepatan PMSG ditunjukkan oleh Gambar 4.2. Input SMC adalah error kecepatan e_ω dan outputnya arus stator sumbu q (i_q^*).



Gambar 4.2 Struktur sliding mode control

Sistem kendali kecepatan dengan metode SMC didesain berdasarkan dinamika mekanik PMSG yang dirumuskan dengan :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e - B \omega_m \quad (4-2)$$

Berdasarkan Persamaan (4-1) dan (4-2), dinamika mekanik PMSG dengan gangguan akibat variasi parameter dapat dirumuskan dengan :

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1.5 n_p \psi_m i_q^*}{J} + K_t \quad (4-3)$$

$$K_t = \frac{T_m - 1.5 n_p \psi_m (i_q^* - i_q) - B \omega_m}{J} \quad (4-4)$$

K_t adalah gangguan sistem. Aturan kontrol dirumuskan dengan :

$$i_q^* = K_e e_\omega + K_s \text{sat}\left(\frac{S}{\delta}\right) + \left(\frac{d\omega_m^*}{dt} A^{-1}\right) \quad (4-5)$$

dengan

$$e_\omega = \omega_m^* - \omega_m \quad \text{dan} \quad A = 1.5 \frac{n_p \psi_m}{J} \quad (4-6)$$

K_e dan K_s adalah penguat error kecepatan dan penguat sliding surface. S adalah sliding surface yang dirumuskan dengan :

$$S = e_\omega + A K_e \int_0^t e_\omega dt \quad (4-7)$$

dengan fungsi saturasi sliding surface :

$$\text{sat}\left(\frac{S}{\delta}\right) = \begin{cases} 1 & \text{jika } S > \delta \\ \frac{S}{\delta} & \text{jika } -\delta < S < \delta \\ -1 & \text{jika } S < -\delta \end{cases} \quad (4-8)$$

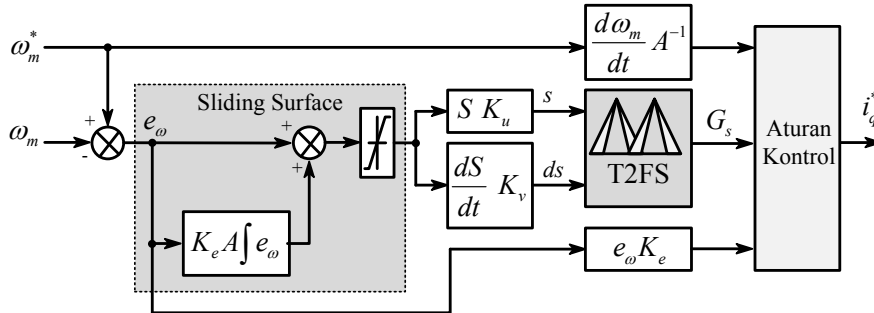
Nilai K_e dan K_s ditentukan dengan metode trial error melalui simulasi dengan panduan fungsi Lyapunov.

4.1.1.2 Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Controller

Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Controller (AFSMOC) didesain untuk meningkatkan kehandalan SMC konvensional dengan membuat penguat adaptif pada sliding surface. Pada SMC konvensional penguat pada sliding surface bernilai konstan. Dalam AFSMOC, nilai penguat sliding surface dibuat bervariasi menggunakan Fuzzy Type-2 System (T2FS), sehingga aturan kontrol SMC dalam Persamaan (4-5) berubah menjadi :

$$i_q^* = K_e e_\omega + G_s \operatorname{sat}\left(\frac{S}{\delta}\right) + \left(\frac{d\omega_m^*}{dt} A^{-1}\right) \quad (4-9)$$

G_s adalah penguat adaptif yang diperoleh dari T2FS. Struktur AFSMOC ditunjukkan oleh Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Struktur AFSMOC

Struktur AFSMOC mirip dengan SMC konvensional. Perbedaannya hanya terdapat pada penguat sliding surface, dimana pada AFSMOC ditambahkan T2FS untuk mendapatkan penguat adaptif. Input T2FS adalah sliding surface s dan turunan sliding surface ds , yang dirumuskan dengan :

$$s = S K_u \quad \text{dan} \quad ds = \frac{dS}{dt} K_v \quad (4-10)$$

dimana K_u dan K_v adalah penguat input T2FS.

4.1.1.3 Desain Type-2 Fuzzy System

Berdasarkan struktur Type-2 System (T2FS) pada Gambar 2.19, pencarian nilai output T2FS meliputi beberapa proses, yaitu fuzzifikasi, inferensi fuzzy, rule base reduksi tipe dan defuzzifikasi.

Pada bagian Fuzzifikasi, nilai crisp input dan output dipetakan ke dalam fungsi keanggotaan yang dipresentasikan dengan *upper membership function* $\bar{\mu}_x(x)$ dan *lower membership function* $\underline{\mu}_x(x)$. Berdasarkan struktur AFSMOC pada Gambar 4.3, crisp input T2FS adalah s dan ds , sedangkan crisp outputnya adalah G_s . Jika input dinyatakan dengan x , maka fungsi keanggotaan crisp input $\mu_x(x)$ dapat dipresentasikan dengan :

$$\mu_x(x) = [\mu_s(x_s), \mu_{ds}(x_{ds})] \quad (4-11)$$

dengan

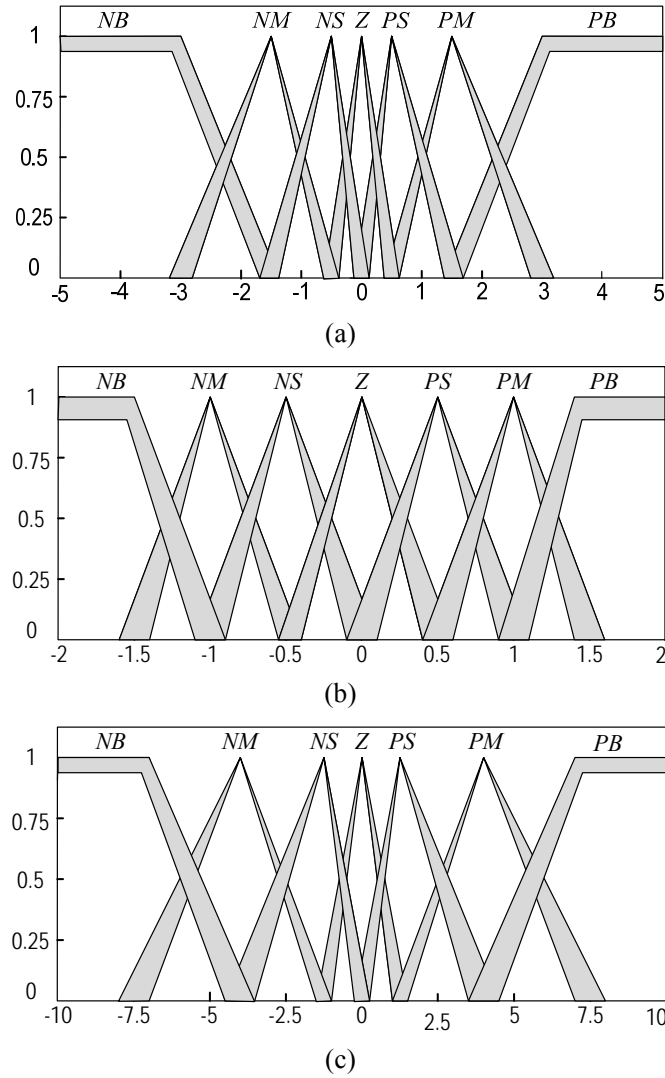
$$\mu_s(x_s) = [\underline{\mu}_s(x_s), \bar{\mu}_s(x_s)] \quad (4-12)$$

$$\mu_{ds}(x_{ds}) = [\underline{\mu}_{ds}(x_{ds}), \bar{\mu}_{ds}(x_{ds})] \quad (4-13)$$

Jika crisp output dinyatakan dengan y , maka fungsi keanggotaan crisp output $\mu_y(y)$ dapat dipresentasikan dengan :

$$\mu_y(y) = \mu_{G_s}(y_{G_s}) = [\underline{\mu}_{G_s}(y_{G_s}), \bar{\mu}_{G_s}(y_{G_s})] \quad (4-14)$$

Dalam penelitian ini, model T2FS dibuat menggunakan toolbox IT2FS versi 1.0. Fungsi keanggotaan crisp input dan output dipresentasikan dengan fungsi keanggotaan segitiga dan trapesium. Nilai fungsi keanggotaan input dan output T2FS ditentukan dengan metode trial error melalui simulasi. Dalam simulasi ini, kecepatan referensi dibuat bervariasi. Berdasarkan metode trial error ini, diperoleh nilai G_s dengan rentang -10 sampai 10, dengan nilai s dari -5 sampai 5 dan nilai d_s dari -2 sampai 2. Masing-masing input dan output T2FS dipresentasikan dengan 7 fungsi keanggotaan, yaitu : *Negatif Big (NB)*, *Negative Medium (NM)*, *Negatif Small (NS)*, *Zero (Z)*, *Positive Small (PS)*, *Positive Medium (PM)* dan *Positive Big (PB)*, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Fungsi keanggotaan T2FS. (a) input s , (b) input ds dan (c) output G_s

Aturan T2FS didesain dengan konsep aturan diagonal. Ada 49 aturan yang digunakan untuk menentukan output T2FS. Aturan ke- i dalam rule base T2FS dirumuskan dengan :

$$R^i = \text{if } s \text{ is } X_s^i \text{ and } ds \text{ is } X_{ds}^i \text{ then } Gs \text{ is } Y_{Gs}^i, \quad i = 1, 2, \dots, 49 \quad (4-15)$$

dengan

$$X_s, X_{ds}, Y_{Gs} \subseteq [NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB] \quad (4-16)$$

Rule base T2FS diuraikan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rule base T2FS

$\begin{matrix} s \\ d_s \end{matrix}$	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>PB</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>
<i>PM</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>
<i>Z</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>
<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>NM</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>	<i>PS</i>
<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>Z</i>

Berdasarkan aturan dalam Persamaan (4-15), inferensi T2FS dengan operasi meet dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\mu_{R^i} = \mu_s(x_s^i) \Pi \mu_{ds}(x_{ds}^i) \Pi \mu_{Gs}(y_{Gs}^i) \quad (4-17)$$

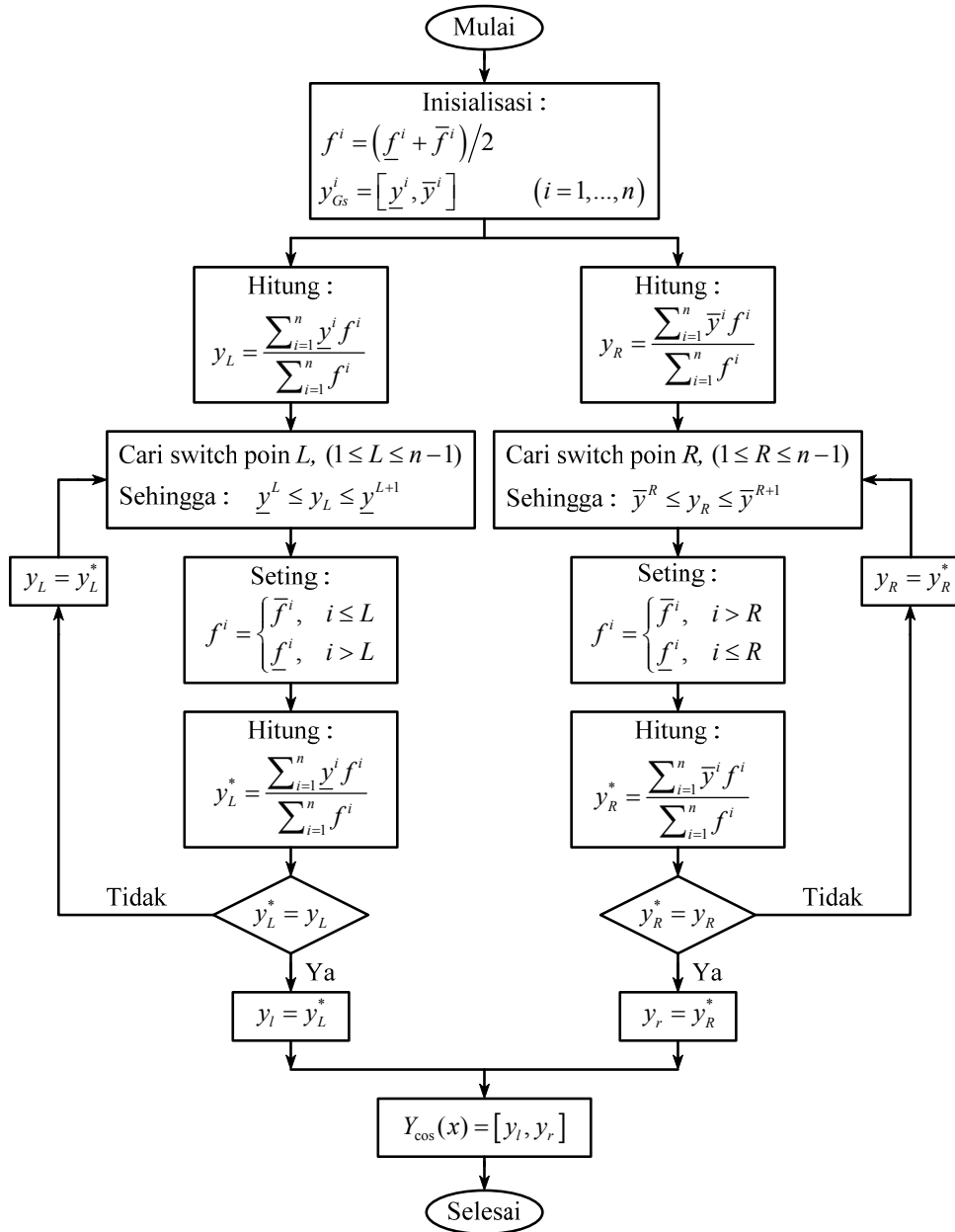
dengan firing strength :

$$F^i(x^i) = \left[\left(\underline{\mu}_s^i(x_s^i) \times \underline{\mu}_{ds}^i(x_{ds}^i) \right), \left(\overline{\mu}_s^i(x_s^i) \times \overline{\mu}_{ds}^i(x_{ds}^i) \right) \right] \equiv \left[\underline{f}^i, \overline{f}^i \right] \quad (4-18)$$

Setelah inferensi fuzzy, selanjutnya dilakukan reduksi tipe menggunakan *Center of Sets* (COS), yang dirumuskan dengan (Liang, 2000) :

$$Y_{\cos}(x^i) = \bigcup_{\substack{f^i \in F^i(x^i) \\ y^i \in Y^i}} \frac{\sum_{i=1}^n f^i y^i}{\sum_{i=1}^n f^i} \equiv [y_l, y_r] \quad (4-19)$$

Y_{COS} adalah interval fuzzy tipe 1, sedangkan y_l adalah titik kiri atau nilai minimum y dan y_r adalah titik kanan atau nilai maksimum y . Nilai y_l dan y_r dapat dihitung dengan menggunakan algoritma Karnik-Mendel (Liang, 2000). Gambar 4.5 menunjukkan diagram alir perhitungan y_l dan y_r menggunakan algoritma Karnik-Mendel.



Gambar 4.5 Diagram alir algoritma Karnik-Mendel

Penguat adaptif sebagai Crisp output T2FS dirumuskan dengan :

$$G_s = y = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (4-20)$$

Setelah nilai G_s diperoleh dari output T2FS, maka aturan kontrol AFSMOC dalam Persamaan (4-9) dapat diselesaikan.

4.1.1.4 Validasi Kontroler Kecepatan dengan Fungsi Lyapunov

Kestabilan kontroler kecepatan, baik SMC maupun AFSMOC divalidasi dengan fungsi Fungsi Lyapunov. Kestabilan SMC ditentukan oleh nilai K_s , sedangkan AFSMOC ditentukan oleh nilai G_s . Poin penting dalam aplikasi fungsi Lyapunov adalah penentuan daerah kestabilan, yaitu daerah tempat kedudukan variabel yang menjaga sistem dalam kondisi stabil (Xia, 2011). Sebuah sistem dikatakan stabil jika nilai fungsi Lyapunovnya lebih kecil dari nilai kritisnya.

Berdasarkan gangguan sistem dalam Persamaan (4-4), daerah kestabilan sistem dapat dibatasi dengan $0 \leq |K_t| < h$, dimana h adalah batasan maksimum gangguan sistem. Asumsikan bahwa dengan menggunakan aturan kontrol SMC dalam Persamaan (4-5), error kecepatan akan konvergen ke nol jika $K_s > A^{-1}h$. Dengan menggunakan fungsi Lyapunov $V = 0.5 S^2$, turunan fungsi Lyapunov untuk SMC dapat dirumuskan dengan :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dS}{dt} S = S \left(\frac{de_\omega}{dt} + A K_e e_\omega \right) \quad (4-21)$$

Berdasarkan Persamaan (4-3) dan (4-6), maka turunan error kecepatan adalah :

$$\frac{de_\omega}{dt} = \frac{d\omega_m^*}{dt} - A i_q^* - K_t \quad (4-22)$$

Substitusikan Persamaan (4-22) ke dalam Persamaan (4-21), sehingga diperoleh :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dS}{dt} S = -A S \left(i_q^* + A^{-1} K_t - K_e e_\omega - A^{-1} \frac{d\omega_m^*}{dt} \right) \quad (4-23)$$

Substitusikan Persamaan (4-5) ke dalam Persamaan (4-23), sehingga diperoleh :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dS}{dt} S = -A \left(K_s |S| + A^{-1} S K_t \right) \quad (4-24)$$

Dengan batasan kestabilan $0 \leq |K_t| < h$ dan dengan asumsi error kecepatan akan konvergen ke nol jika $K_s > A^{-1}h$, maka dari Persamaan (4-24) diperoleh kandidat fungsi Lyapunov berikut :

$$\frac{dV}{dt} \leq -A |S| (K_s - A^{-1} h) < 0 \quad (S \neq 0) \quad (4-25)$$

Teorema dalam Persamaan (4-25) akan terbukti jika Persamaan (4-5) membuat Persamaan (4-7) konvergen ke nol. Persamaan (4-25) dijadikan panduan dalam menentukan nilai K_s untuk SMC dan nilai G_s pada AFSMOC.

4.1.2 Regulator Arus

Kecepatan PMSG dikendalikan melalui VSMC dengan cara mengatur arus stator i_q^* menggunakan AFSMOC. VSMC dimodulasi berdasarkan tegangan referensi dalam sumbu $\alpha\beta$ (v_α^* , v_β^*), sedangkan output AFSMOC dalam bentuk arus i_d^* dan i_q^* . Untuk mendapatkan tegangan referensi digunakan regulator arus dengan metode SMC. Tegangan referensi dalam sumbu dq dirumuskan dengan :

$$\begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s i_d - \omega_e L_q i_q \\ R_s i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_d \text{sig}(S_d) \\ K_q \text{sig}(S_q) \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

dengan

$$S_d = i_d^* - i_d \quad \text{dan} \quad S_q = i_q^* - i_q \quad (4-27)$$

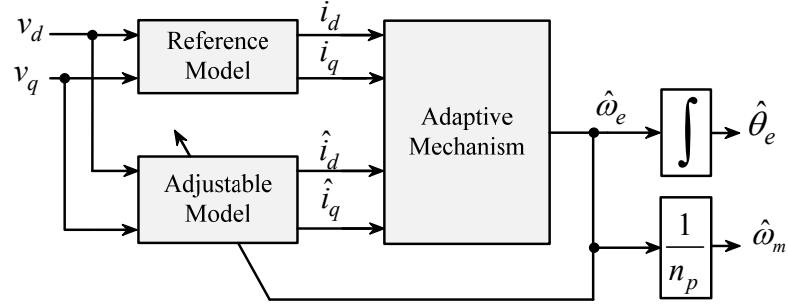
S_d dan S_q adalah sliding surface arus, sedangkan K_d dan K_q adalah penguat sliding surface. Tegangan referensi untuk VSMC dirumuskan dengan :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d^* \\ v_q^* \end{bmatrix} \quad (4-28)$$

VSMC akan menghasilkan tegangan output sesuai dengan referensi dari kontroler kecepatan, sehingga kecepatan generator beroperasi pada kecepatan referensi untuk daya maksimum.

4.1.3 Model Reference Adaptive System Observer

Model Reference Adaptive System (MRAS) observer berfungsi sebagai pengganti sensor kecepatan untuk mendapatkan parameter kecepatan terukur generator. MRAS observer didesain berdasarkan referensi arus stator dalam sumbu dq . MRAS observer terdiri dari reference model, adjustable model dan adaptation mechanism, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6.



Gambar 4.6 MRAS observer berdasarkan model arus stator

Arus stator pada reference model dirumuskan dengan :

$$\frac{d i_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \omega_e i_q + \frac{v_d}{L_d} \quad (4-29)$$

$$\frac{d i_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \omega_e i_d - \omega_e \frac{\psi_m}{L_q} + \frac{v_q}{L_q} \quad (4-30)$$

Berdasarkan Persamaan (4-29) dan (4-30), arus stator dalam *adjustable model* dirumuskan dengan :

$$\frac{d \hat{i}_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} \hat{i}_d + \hat{\omega}_e \hat{i}_q + \frac{v_d}{L_d} \quad (4-31)$$

$$\frac{d \hat{i}_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} \hat{i}_q - \hat{\omega}_e \hat{i}_d - \hat{\omega}_e \frac{\psi_m}{L_q} + \frac{v_q}{L_q} \quad (4-32)$$

Hasil estimasi kecepatan mekanik rotor $\hat{\omega}_m$ dan sudut elektrik rotor $\hat{\theta}_e$ diperoleh dari *adaptation mechanism* menggunakan kontroler PI, yang dirumuskan dengan persamaan :

$$\hat{\omega}_m = \frac{\hat{\omega}_e}{n_p} \quad \text{dan} \quad \hat{\theta}_e = \int \hat{\omega}_e dt \quad (4-33)$$

dengan

$$\hat{\omega}_e = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(i_d \hat{i}_q - \hat{i}_d i_q - \frac{\psi_m}{L} (i_q - \hat{i}_q) \right) + \hat{\omega}_{e0} \quad (4-34)$$

4.2 Algoritma MPPT

Algoritma MPPT digunakan untuk mencari kecepatan referensi pada titik daya maksimum. Dalam penelitian ini, algoritma MPPT diusulkan menggunakan multiclass LS-SVM berdasarkan prinsip algoritma Pertubasi dan Observasi (PO).

4.2.1 Algoritma Pertubasi dan Observasi

Algoritma Pertubasi dan Observasi (PO) atau disebut juga metode *Hill Climbing Search* (HCS) merupakan teknik optimasi yang digunakan untuk mencari titik optimum sebuah fungsi (Abdullah, 2012). Prinsip kerja algoritma PO dalam mencari kecepatan referensi pada titik daya maksimum ditunjukkan oleh Gambar 2.17. Input algoritma PO adalah perubahan daya output generator ΔP_o dan outputnya adalah kecepatan referensi ω_m^* . Setiap terjadi perubahan daya output generator, maka kecepatan referensi akan bergerak ke titik maksimum sebesar ukuran step $\Delta \omega_m$. Arah gerakan step ditentukan oleh arah ΔP_o . Jika ΔP_o negatif, maka $\Delta \omega_m$ juga negatif. Kecepatan referensi sebagai output algoritma MPPT dapat dihitung dengan Persamaan :

$$\omega_{m(i)}^* = \begin{cases} \omega_{m(i-1)} + \Delta \omega_m & \text{jika } \Delta P_o > 0 \\ \omega_{m(i-1)} - \Delta \omega_m & \text{jika } \Delta P_o < 0 \end{cases} \quad (4-35)$$

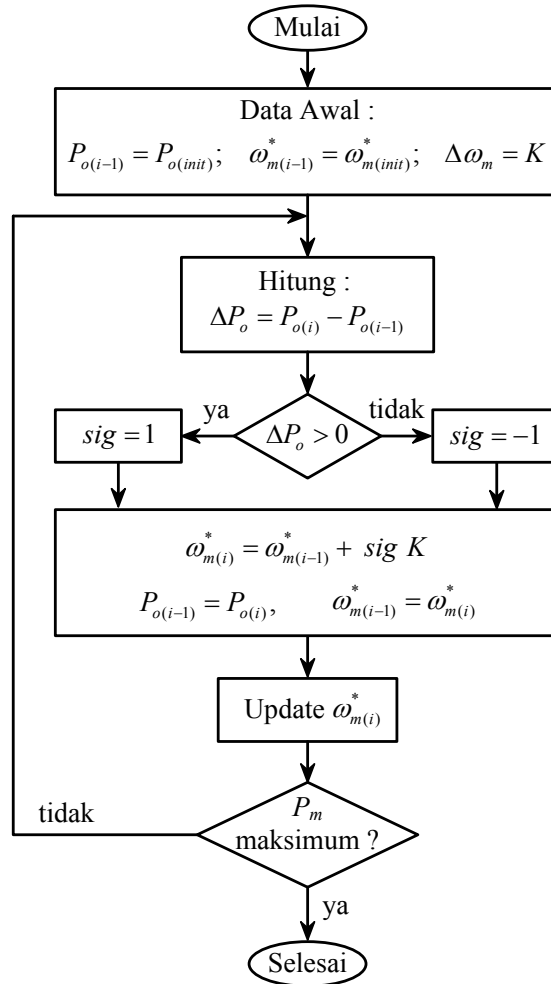
dengan

$$\Delta P_o = P_{o(i)} - P_{o(i-1)} \quad (4-36)$$

P_o adalah daya output generator. Indek (i) mempresentasikan data ke- i dan ($i-1$) mempresentasikan data sebelumnya. Daya output generator diasumsikan maksimum jika turbin angin menghasilkan daya mekanik maksimum P_{m_max} . Daya mekanik turbin angin akan maksimum jika generator beroperasi pada kecepatan referensi pada titik koefisien daya maksimum turbin angin, yang dirumuskan dengan Persamaan :

$$P_{m_max} = 0.5 \rho A C_{p_max} \left(\frac{\omega_m^* R}{\lambda_{opt}} \right)^3 \quad (4-37)$$

ω_m^* adalah kecepatan referensi yang dihasilkan algoritma MPPT, C_{p_max} adalah koefisien daya maksimum turbin angin dan λ_{opt} adalah TSR optimum turbin angin. Nilai C_{p_max} dan λ_{opt} dapat diperoleh dari hasil pengujian turbin angin melalui simulasi. Prinsip kerja algoritma MPPT menggunakan algoritma PO ditunjukkan oleh Gambar 4.7.



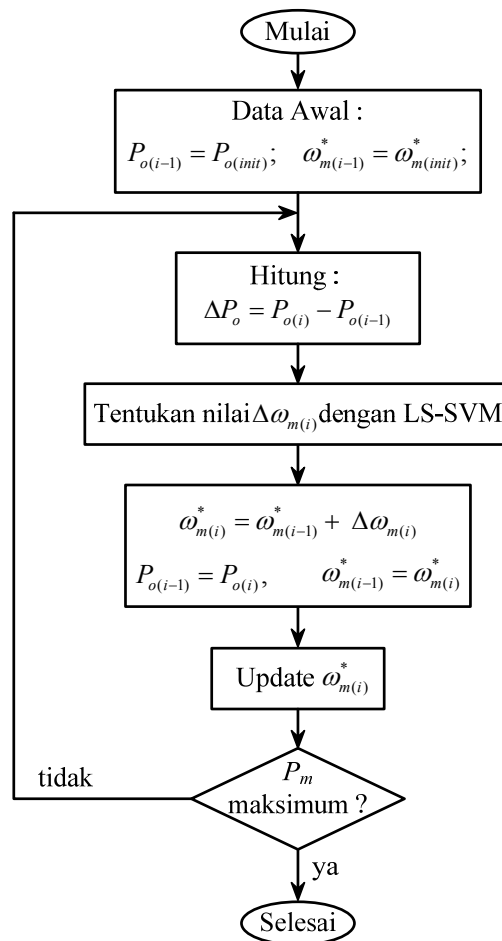
Gambar 4.7 Diagram alir algoritma MPPT menggunakan algoritma PO

Kinerja algoritma PO ditentukan oleh ukuran step $\Delta\omega_m$ yang bernilai konstan. Kelemahan algoritma PO adalah rumitnya menentukan $\Delta\omega_m$ yang sesuai. Nilai $\Delta\omega_m$ yang besar akan mempercepat respon mencapai titik maksimum, tapi juga akan menimbulkan riak sebesar $\Delta\omega_m$ pada titik maksimum. Sebaliknya, nilai $\Delta\omega_m$ yang kecil dapat meminimalisir riak kecepatan pada titik daya maksimum

tapi akan memperlambat kecepatan referensi mencapai titik daya maksimum. Untuk mengatasi hal ini diusulkan nilai $\Delta\omega_m$ yang bervariasi, sehingga dapat mempercepat respon mencapai titik maksimum dan dapat meminimalkan riak pada titik maksimum.

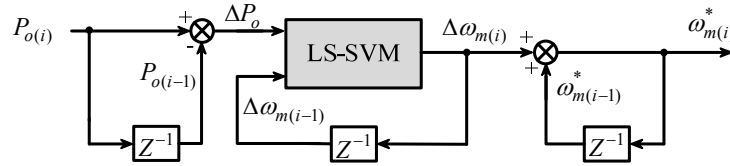
4.2.2 Algoritma Multiclass Least Squares Support Vector Machine

Algoritma *Multiclass Least Squares Support Vector Machine* (LS-SVM) didesain untuk mendapatkan nilai step $\Delta\omega_m$ yang bervariasi, sehingga permasalahan algoritma MPPT yang menggunakan algoritma PO dapat diatasi. Prinsip kerja algoritma MPPT dalam mencari kecepatan referensi generator pada titik daya maksimum dengan metode LS-SVM ditunjukkan oleh Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Diagram alir algoritma MPPT dengan metode LS-SVM

Model LS-SVM dalam algoritma MPPT yang ditunjukkan oleh Gambar 4.8 digunakan untuk mencari nilai $\Delta\omega_m$, dimana nilainya bervariasi sesuai dengan perubahan daya output generator ΔP_o dan ukuran step sebelumnya $\Delta\omega_{m(i-1)}$. Gambar 4.9 menunjukkan skema penentuan nilai $\Delta\omega_m$ menggunakan algoritma LS-SVM.

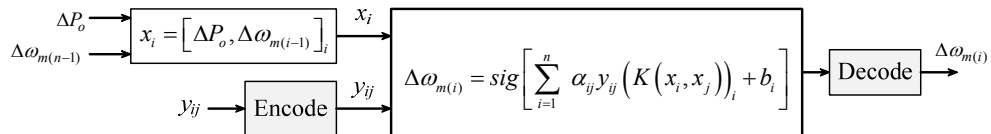


Gambar 4.9 Skema penentuan ukuran step dengan algoritma LS-SVM

Berdasarkan Gambar 4.9, input multiclass LS-SVM adalah perubahan daya output generator ΔP_o dan ukuran step sebelumnya $\Delta\omega_{m(i-1)}$, sedangkan outputnya adalah ukuran step $\Delta\omega_{m(i)}$. Parameter $\Delta\omega_{m(i-1)}$ ditambahkan sebagai input untuk meminimalkan salah arah pencarian titik maksimum. Prinsip kerja dari metode ini adalah jika perubahan daya positif dengan ukuran step sebelumnya juga positif, maka ukuran step output LS-SVM juga positif besar. Sebaliknya, jika ukuran step sebelumnya negatif, maka ukuran step output LS-SVM juga negatif. Kecepatan referensi $\omega_{m(i)}^*$ sebagai output algoritma MPPT dihitung dengan Persamaan :

$$\omega_{m(i)}^* = \omega_{m(i-1)} + \Delta\omega_{m(i)} \quad (4-38)$$

Blok LS-SVM pada Gambar 4.9 akan menghasilkan $\Delta\omega_m$ yang bervariasi, dimana jumlah variasi $\Delta\omega_m$ merupakan jumlah kelas data output LS-SVM. Uraian blok LS-SVM Gambar 4.9 ditunjukkan oleh Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Blok LS-SVM

Berdasarkan Gambar 4.10, output LS-SVM $\Delta\omega_{m(i)}$ dirumuskan dengan Persamaan :

$$\Delta\omega_{m(i)} = \text{sig} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{ij} \left(K(x_i, x_j) \right)_i + b_i \right] \quad (4-39)$$

dimana $i = 1, 2, \dots, m$ adalah data ke- i dengan m adalah jumlah data input dan $j = 1, 2, \dots, n$ adalah kelas data ke- j dengan n adalah jumlah kelas data. y_{ij} adalah pola atau kelas data output, $x_i = [\Delta P_o, \Delta\omega_{m(i-1)}]_i$ adalah data input LS-SVM, $(K(x_i, x_j))_i$ adalah kernel trik, a_{ij} dan b_i adalah nilai support vector dan bias yang diperoleh melalui proses optimasi. $\Delta\omega_{m(i)}$ adalah output LS-SVM.

Sebelum menentukan nilai output, terlebih dahulu dilakukan encode pola data output, yaitu mengubah kelas real data output menjadi kelas biner. Hal ini dilakukan karena proses klasifikasi hanya bisa dilakukan dalam bentuk biner. Setelah proses klasifikasi, data output hasil klasifikasi dikembalikan menjadi data real melalui decode data. Teknik encode yang dipakai dalam penelitian ini adalah metode *One Vs One*. Dalam metode ini dibangun klasifikasi biner sebanyak :

$$n_b = j(j-1)/2 \quad (4-40)$$

Proses decode dipilih menggunakan metode *hamming distance*, yaitu salah satu metode penyamaan antara dua buah pola berdasarkan fungsi jarak (Gestel, 2002). Metode ini diaplikasikan dalam multiclass LS-SVM dengan cara membandingkan data biner hasil klasifikasi dengan data biner hasil encode. Data biner hasil klasifikasi akan dimasukkan dalam kelas yang memiliki jarak terdekat dengan kelas data biner hasil encode. Setelah kelas data hasil klasifikasi diperoleh, selanjutnya kelas data tersebut dikembalikan ke data awal yang polanya tersimpan dalam memori encode.

Kelas data output LS-SVM dalam penelitian ini dibagi menjadi 35 kelas. Kelas data ini merupakan variasi ukuran step algoritma MPPT dengan nilai minimum -1.5 rpm dan nilai maksimum 1.5 rpm. Rentang nilai ini dipilih dengan pertimbangan bahwa rentang ukuran step yang terlalu besar akan membuat generator beroperasi dalam bentuk motoring pada kondisi transien. Variasi ukuran step atau kelas data output LS-SVM diuraikan dalam Tabel 4.2.

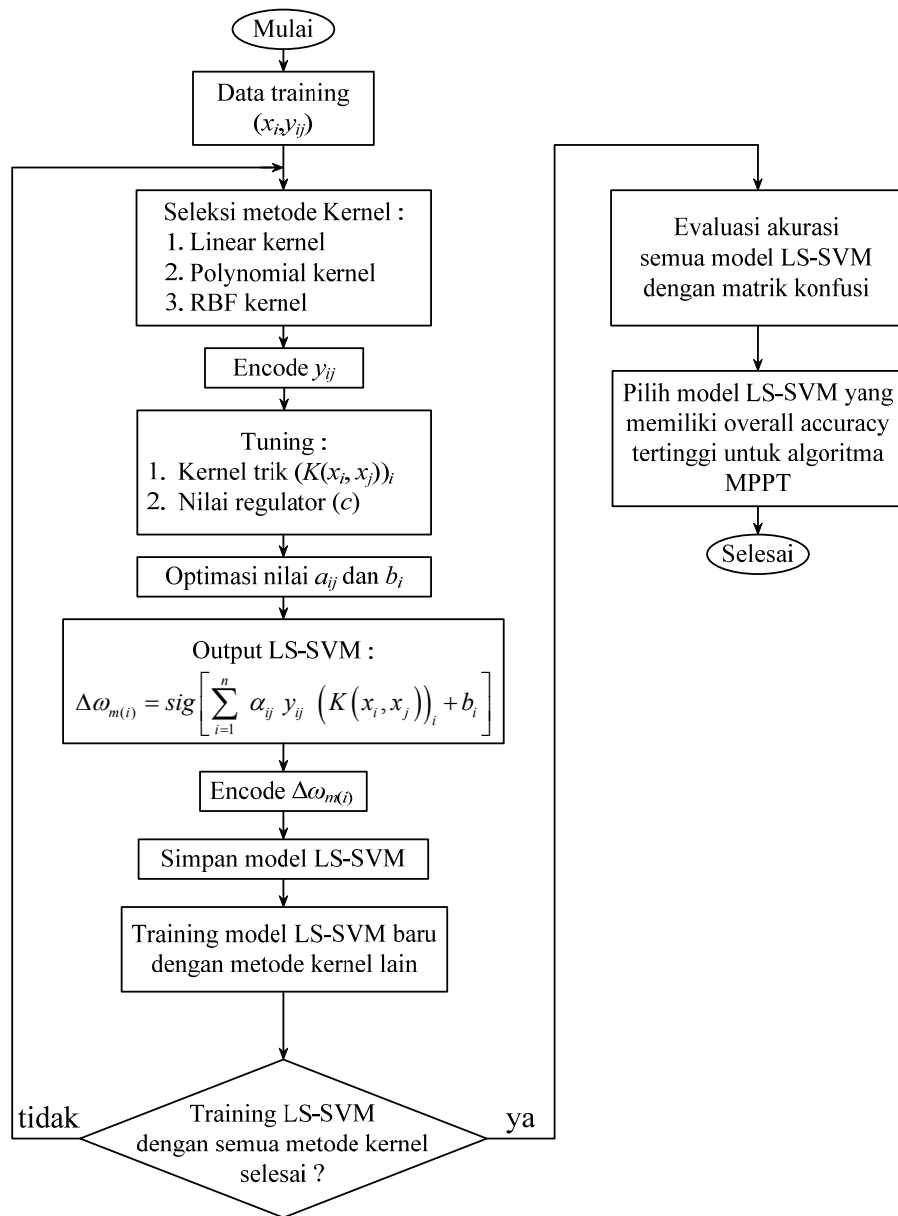
Tabel 4.2 Kelas data output LS-SVM

Kelas	$\Delta\omega_m$ (rpm)	Kelas	$\Delta\omega_m$ (rpm)	Kelas	$\Delta\omega_m$ (rpm)	Kelas	$\Delta\omega_m$ (rpm)
1	-1.5	10	-0.6	19	0.05	28	0.8
2	-1.4	11	-0.5	20	0.075	29	0.9
3	-1.3	12	-0.4	21	0.1	30	1
4	-1.2	13	-0.3	22	0.2	31	1.1
5	-1.1	14	-0.2	23	0.3	32	1.2
6	-1	15	-0.1	24	0.4	33	1.3
7	-0.9	16	-0.075	25	0.5	34	1.4
8	-0.8	17	-0.05	26	0.6	35	1.5
9	-0.7	18	0	27	0.7		

4.2.2.1 Training Multiclass Least Squares Support Vector Machine

Training multiclass LS-SVM ditujukan untuk mendapatkan model LS-SVM yang memiliki kelas data output seperti yang diuraikan dalam Tabel 4.2. Model multiclass LS-SVM dibuat menggunakan toolbox LS-SVM versi 1.8. Toolbox ini dapat digunakan untuk multiclass LS-SVM dengan beberapa teknik encode dan decode serta beberapa metode kernel (Brabanter, 2011). Model multiclass LS-SVM dirancang menggunakan encode *One vs One* dengan decode *hamming distance*. Algoritma diujicoba dengan tiga metode kernel, yaitu linear kernel, polynomial kernel dan RBF kernel. Setiap model dievaluasi menggunakan asesmen akurasi berdasarkan matrik konfusi, yang terdiri dari user accuracy, producer accuracy dan overall accuracy. Model yang memiliki overall accuracy tertinggi dipilih untuk algoritma MPPT.

Sebelum training LS-SVM, terlebih dahulu dilakukan seleksi data training, yang mencakup data input $x_i = [\Delta P_o, \Delta\omega_{m(i-1)}]_i$ dan data target output y_{ij} . Data input ΔP_o diperoleh dari hasil simulasi algoritma PO. Data ΔP_o ini kemudian diseleksi untuk menghilangkan data yang sama, sehingga diperoleh nilai ΔP_o dengan rentang -40 sampai 40. Setelah itu dilakukan pemilihan nilai $\Delta\omega_{m(i-1)}$ dan y_{ij} berdasarkan kelas data yang terdapat pada Tabel 4.2 untuk setiap ΔP_o . Dari seleksi data training ini diperoleh jumlah data training sebanyak 2745 sampel. Selanjutnya dilakukan training data dengan langkah seperti yang ditunjukkan oleh diagram alir 4.11.



Gambar 4.11 Diagram alir training LS-SVM

Langkah pertama dalam training LS-SVM adalah menentukan metode kernel yang digunakan. Dalam penelitian ini ada tiga metode kernel yang digunakan, yaitu linear kernel, polynomial kernel dan RBF kernel. Selanjutnya dilakukan encode data output y_{ij} menggunakan metode *One Vs One*. Jika jumlah kelas real adalah 35 kelas, maka dengan menggunakan persamaan (4-40) diperoleh jumlah kelas biner sebanyak 595 kelas. Selanjutnya dilakukan tuning

parameter kernel dan nilai regulator c untuk proses optimasi nilai support vector a_{ij} dan nilai bias b_i . Parameter kernel dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$\text{Linear kernel : } \left(K(x_i, x_j) \right)_i = x_i^T x_j \quad (4-41)$$

$$\text{Polynomial kernel : } \left(K(x_i, x_j) \right)_i = \left(x_i^T x_j + 1 \right)^d \quad (4-42)$$

$$\text{RBF kernel : } \left(K(x_i, x_j) \right)_i = \exp \left(-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma^2 \right) \quad (4-43)$$

x_j adalah pusat data x , d adalah derajat polynomial dan σ adalah konstantan RBF kernel.

Proses training data multiclass LS-SVM adalah mencari *hyperplane* terbaik diantara kelas data melalui fungsi optimasi. Hyperplane terbaik diperoleh dengan mengoptimalkan nilai support vector a_{ij} dan nilai bias b_i . Proses optimasi a_{ij} dan b_i dilakukan dengan menggunakan fungsi optimasi dengan batasan sebagai berikut :

$$\min_{w_i, b_i, e_{ij}} J^m(w_i, b_i, e_{ij}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m w_i^T w_i + \frac{c}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m e_{ij}^2 \quad (4-44)$$

dengan subjek batasan :

$$\begin{aligned} y_{1j} \left[w_1^T g_1(x_i) + b_1 \right] &= 1 - e_{1j} \\ y_{1j} \left[w_2^T g_2(x_i) + b_2 \right] &= 1 - e_{2j} \\ &\dots\dots \\ y_{mj} \left[w_m^T g_m(x_i) + b_m \right] &= 1 - e_{mj} \end{aligned} \quad (4-45)$$

e adalah error training, w adalah pembobot dan $g(x_i)$ adalah fungsi memetakan data x_i ke ruang vektor yang berdimensi lebih tinggi. Proses optimasi pada Persamaan (4-44) dan (4-45) diselesaikan dengan perkalian *Lagrange* berikut :

$$L(w_i, b_i, e_{ij}; \alpha_{ij}) = J - \sum_{ij} \alpha_{ij} \left(y_{ij} \left[w_i^T g_i(x_i) + b_i \right] - 1 + e_{ij} \right) \quad (4-46)$$

Kondisi optimal Persamaan (4-47) diperoleh dengan menggunakan ketentuan *Karush Kuhn Tucker* (KKT) berikut :

$$\begin{aligned}
\frac{dL}{dw_i} = 0 & \rightarrow w = \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} y_{ij} g_i(x_j) \\
\frac{dL}{db_i} = 0 & \rightarrow \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} y_{ij} = 0 \\
\frac{dL}{de_{ij}} = 0 & \rightarrow \alpha_{ij} = c e_{ij} \\
\frac{dL}{d\alpha_{ij}} = 0 & \rightarrow y_i [w_i^t g_i(x_j) + b_i] = 1 - e_{ij}
\end{aligned} \tag{4-48}$$

Dengan mengeliminasi w dan e , diperoleh persamaan linear berikut :

$$\begin{bmatrix} 0 & Y_M^t \\ Y_M & G_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_i \\ \alpha_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4-49}$$

dengan

$$Y_M = \text{blockdiag} \left\{ \begin{bmatrix} y_{11} \\ \dots \\ y_{1n} \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} y_{m1} \\ \dots \\ y_{mn} \end{bmatrix} \right\} \tag{4-50}$$

$$G_M = \text{blockdiag} \{ G_{1j}, \dots, G_{mj} \} \rightarrow G_M = y_{ij} y_{ij} (K(x_i, x_j)) + c^{-1} I \tag{4-51}$$

I adalah matrik identitas. Dari Persamaan (4-49) diperoleh nilai α sebagai berikut :

$$\alpha_{ij} = G_M^{-1} (1 - Y_M b_i) \tag{4-52}$$

Nilai bias b diperoleh dengan mensubsitusikan Persamaan (4-52) ke dalam Persamaan (4-49), sehingga diperoleh :

$$b_i = \frac{Y_M^t G_M^{-1} 1}{Y_M^t G_M^{-1} Y_M} \tag{4-53}$$

Setelah nilai support α_{ij} , bias b_i dan nilai kernel trik ($K(x_i, x_j)$) diketahui, maka klasifikasi data biner dapat diselesaikan dengan persamaan :

$$\Delta \omega_{m(i)} = \text{sig} \left[\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{ij} (K(x_i, x_j))_i + b_i \right] \tag{4-54}$$

Selanjutnya dilakukan decode data hasil training dengan metode *hamming distance*. Model multiclass LS-SVM yang diperoleh lalu disimpan dan

selanjutnya dilakukan training dengan metode kernel yang berbeda. Setelah proses training LS-SVM dengan ketiga kernel selesai, selanjutnya dilakukan validasi dengan asesmen akurasi menggunakan matrik konfusi, yang terdiri dari *overall accuracy*, *producer accuracy* dan *user accuracy*. Model LS-SVM yang memiliki overall accuracy tertinggi dipilih untuk diaplikasikan dalam algoritma MPPT.

4.2.2.2 Evaluasi Model Multiclass Least Squares Support Vector Machine

Untuk memilih model LS-SVM yang akan digunakan untuk algoritma MPPT, maka digunakan asesmen akurasi menggunakan matrik konfusi. Ada tiga model akurasi berdasarkan matrik konfusi, yaitu *overall accuracy*, *producer accuracy* dan *user accuracy*. *Overall accuracy* adalah jumlah sampel data yang terklasifikasi dengan benar (Zhang, 2012). *Overall accuracy* dirumuskan dengan :

$$Overall\ accuracy = \frac{Jumlah\ data\ diagonal\ (i,i)}{jumlah\ sampel\ data} \times 100\% \quad (4-55)$$

Producer accuracy mempresentasikan data yang terklasifikasi secara benar dalam sebuah kelas. Producer accuracy dirumuskan dengan :

$$producer\ Accuracy = \frac{Jumlah\ data\ diagonal\ (i,i)}{jumlah\ data\ dalam\ kolom\ i} \times 100\% \quad (4-56)$$

User accuracy mempresentasikan data yang terklasifikasi secara benar untuk sebuah kelasnya (Zhang, 2012). User accuracy dirumuskan dengan :

$$user\ Accuracy = \frac{Jumlah\ data\ diagonal\ (i,i)}{jumlah\ data\ dalam\ baris\ i} \times 100\% \quad (4-57)$$

Model multiclass LS-SVM ditraining dengan tiga metode kernel, yaitu linear kernel, polynomial kernel dan RBF kernel. Model yang dipilih untuk algoritma MPPT adalah model yang menghasilkan *overall accuracy* tertinggi diantara ketiga model.

BAB 5

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan hasil penelitian yang mencakup hasil simulasi turbin angin, pemilihan model multiclass LS-SVM untuk algoritma MPPT, hasil simulasi kontroller kecepatan, hasil simulasi algoritma MPPT, performansi VSMC dan hasil simulasi dengan *National Intrument Data Acquisition* (NIDAQ) USB 6211.

Simulasi dilakukan melalui simulink dan NIDAQ USB 6211 menggunakan model yang terdapat pada Gambar 4.1. Model diuji dengan kecepatan angin yang bervariasi dengan parameter simulasi seperti yang terdapat dalam Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Parameter simulasi

Komponen	Parameter	Simbol	Nilai
Turbin angin	Jari-jari turbin	R	2 m
	Densitas udara	ρ	1.22 kg/m ³
	Momen inersia turbin	J_w	0.05 kg m ²
	Koefisien daya maksimum	C_{p_max}	0,5312
	TSR optimum	λ_{opt}	8.09
	Cut in kecepatan angin	$v_{w_{in}}$	2 m/dt
	Cut off kecepatan angin	v_{w_o}	9 m/dt
PMSG	Rating daya	P_o	2.5 kW
	Resistansi stator	R_s	0.5 Ω
	Induktansi stator	L_s	8.5 mH
	Jumlah pasang kutub	n_p	18
	Fluksi magnet permanen	ψ_m	0.23 Wb
	Momen inersia	J_g	0.075 kg m ²
	Koefisien friksi	B	0.005 N.m.s/rad
VSMC	Frekuensi switching	f_c	7500 Hz
	Filter inductor	L_f	3.143 mH
	Filter kapasitor	C_f	3.6774 μ F
Grid	Tegangan fasa-fasa	V_{in}	380 Volt
	Frekuensi	f_s	50 Hz
	Impedansi	R_g	0.134 Ω
		L_g	0.119 mH
Beban	Beban resistor	R_L	2 kW

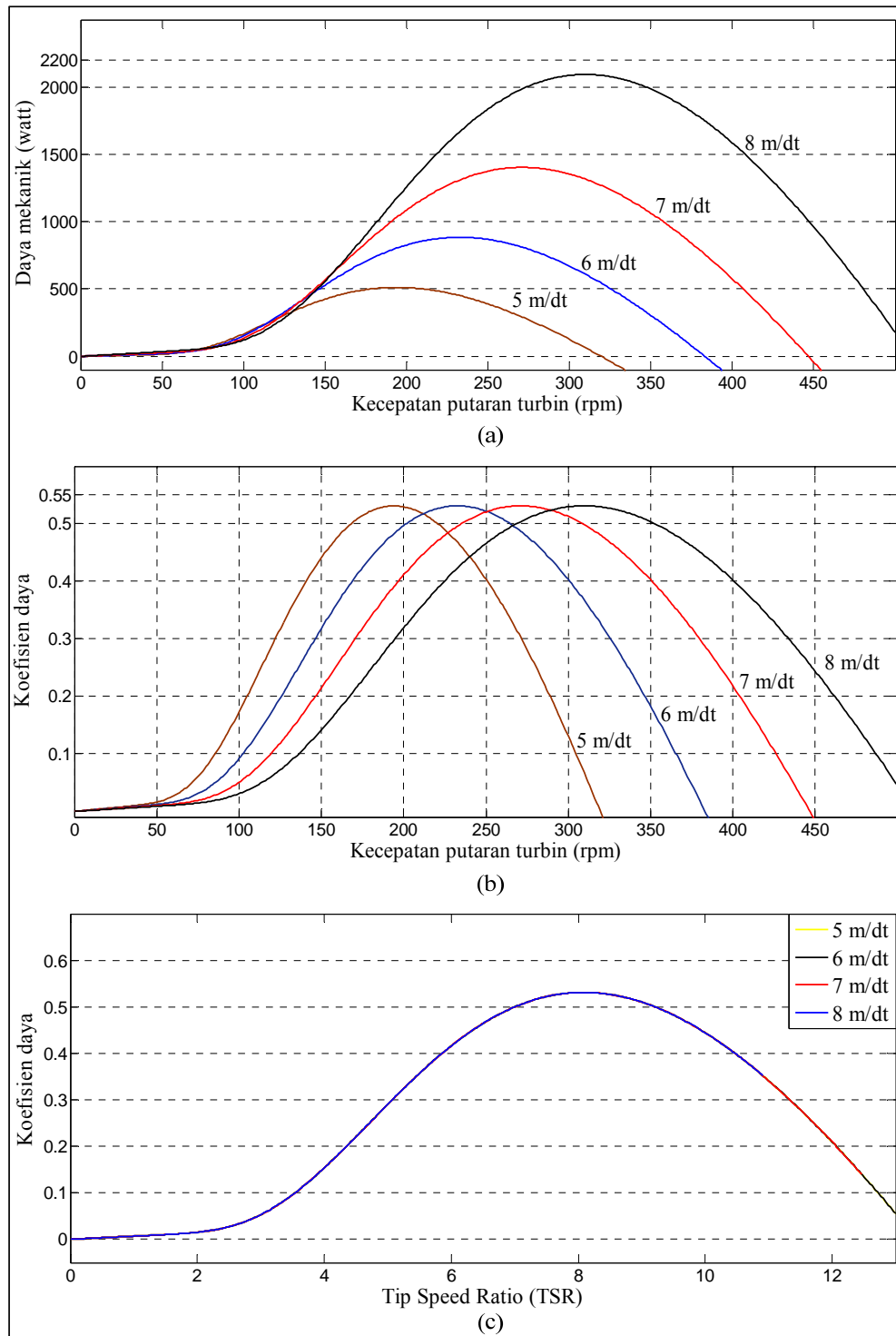
5.1 Hasil Simulasi Turbin Angin

Bagian ini menjelaskan hasil simulasi model turbin angin yang terdapat pada Gambar 3.3. Simulasi dilakukan untuk mengetahui karakteristik daya mekanik, nilai koefisien daya dan nilai TSR turbin angin. Turbin angin diuji dengan kecepatan angin 5 m/dt, 6 m/dt, 7 m/dt dan 8 m/dt, sedangkan kecepatan putaran turbin diatur dari 0 rpm – 500 rpm untuk setiap variasi kecepatan angin. Gambar 5.1 menunjukkan karakteristik turbin angin dari model yang dirancang.

Gambar 5.1(a) menunjukkan bahwa daya mekanik turbin angin bervariasi sesuai dengan perubahan kecepatan angin dan putaran turbin. Kurva daya memiliki satu titik daya maksimum pada setiap kecepatan angin. Titik ini berada pada kecepatan generator yang berbeda pada setiap kecepatan angin. Titik daya maksimum ini merupakan titik koefisien daya maksimum, yang nilainya sama pada semua kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.1(b).

Koefisien daya merupakan rasio daya mekanik yang dihasilkan turbin angin dengan daya angin yang ditangkap oleh turbin. Model turbin angin yang dirancang dalam penelitian ini memberikan nilai koefisien daya maksimum 0.53125. Hal ini menunjukkan bahwa turbin angin dapat menghasilkan daya mekanik maksimum sebesar 53.125% dari daya angin yang ditangkap turbin. Berdasarkan Betz limit, nilai maksimum koefisien daya turbin angin adalah 0.593. Berdasarkan standar betz limit ini, efisiensi model turbin angin yang dibuat telah mendekati efisiensi maksimum turbin angin.

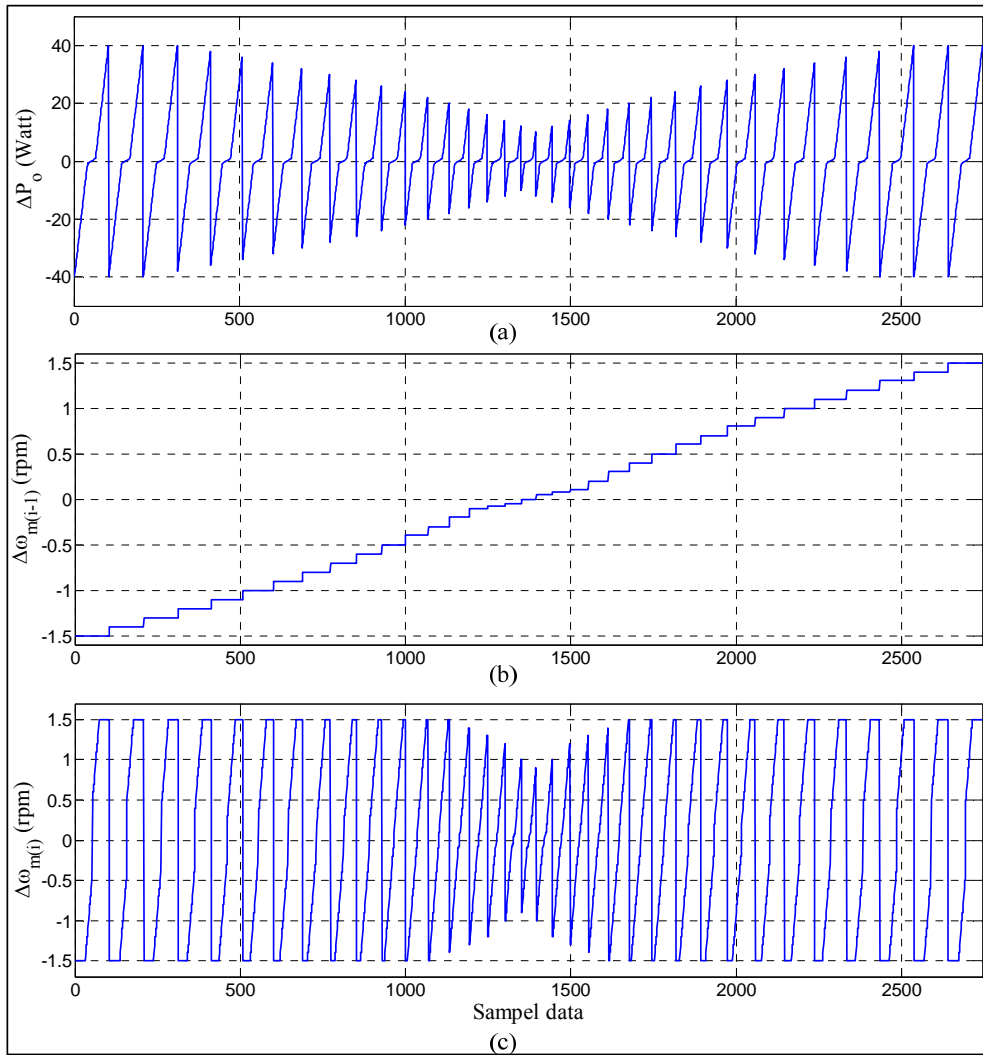
Titik koefisien daya maksimum pada Gambar 5.1(b) berada pada titik TSR optimum. TSR merupakan rasio kecepatan putaran turbin dengan kecepatan angin. Model turbin yang dirancang memberikan nilai TSR optimum sebesar 8.09, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.1(c). Nilai TSR optimum ini sama pada setiap kecepatan angin. Dengan diketahuinya nilai TSR optimum ini, maka kecepatan referensi untuk titik daya maksimum dapat dihitung dengan Persamaan (2-17). Kecepatan referensi hasil perhitungan ini dijadikan acuan untuk menilai kinerja algoritma MPPT dalam mencari kecepatan referensi pada titik daya maksimum. Nilai koefisien daya maksimum dan nilai TSR optimum ini dijadikan acuan untuk menilai kinerja controller MPPT dalam mengendalikan daya output generator.



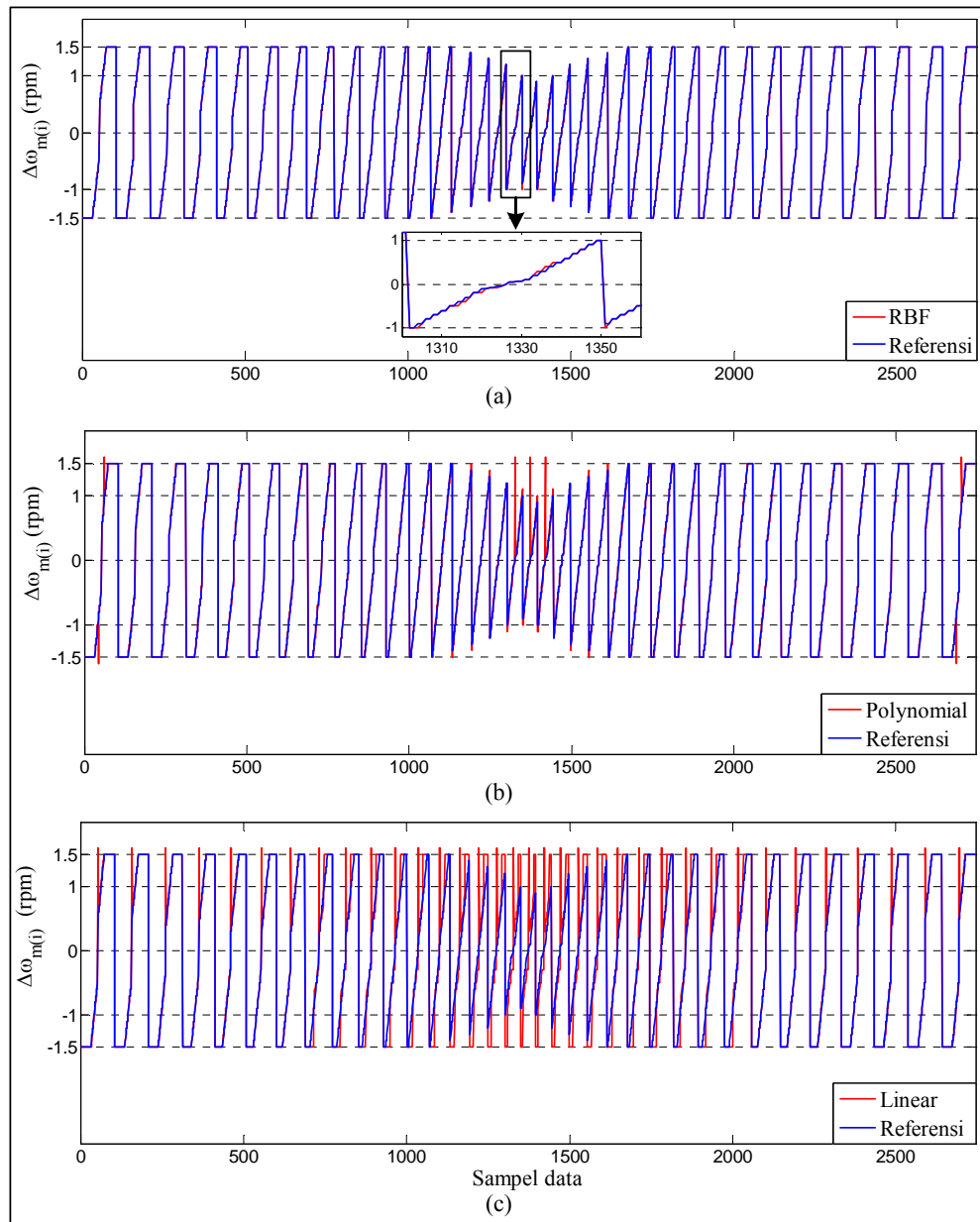
Gambar 5.1 Karakteristik turbin angin.
(a) daya mekanik, (b) koefisien daya, dan (c) TSR

5.2 Hasil Pemilihan Model LS-SVM untuk Algoritma MPPT

Bagian ini menjelaskan hasil training dan pemilihan model LS-SVM untuk algoritma MPPT. Training LS-SVM menggunakan tiga metode kernel, yaitu linear kernel, polynomial kernel dan RBF kernel. Model LS-SVM ditraining dengan 2745 sampel data dengan input perubahan daya output generator ΔP_o dan ukuran step sebelumnya $\Delta \omega_{m(i-1)}$, sedangkan outputnya adalah ukuran step $\Delta \omega_{m(i)}$ dengan variasi 35 kelas, seperti yang terdapat dalam Tabel 4.2. Gambar 5.2 menunjukkan pola data input dan output untuk training model LS-SVM.



Gambar 5.2 Data training LS-SVM. (a) input ΔP_o , (b) input $\Delta \omega_{m(i-1)}$, dan (c) output $\Delta \omega_{m(i)}$



Gambar 5.3 Output hasil training LS-SVM $\Delta\omega_{m(i)}$.
(a) RBF kernel, (b) Polynomial kernel dan (c) Linear kernel

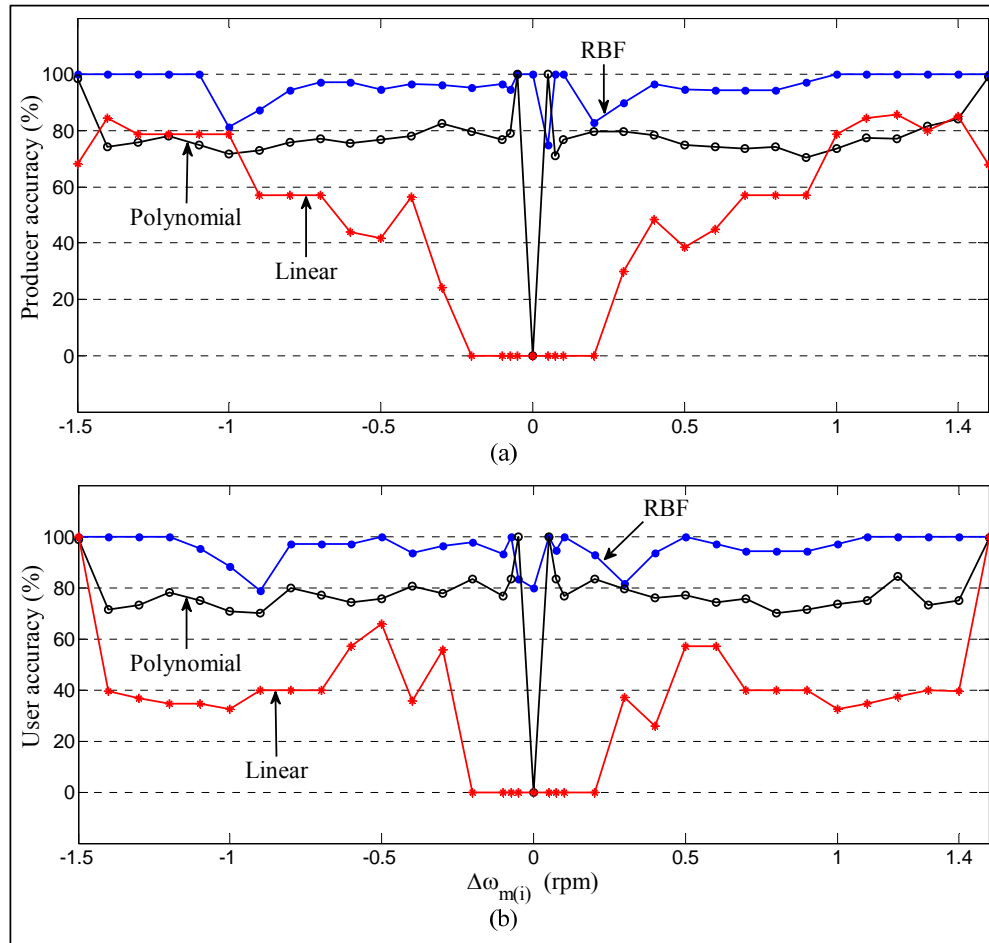
Gambar 5.3 menunjukkan hasil training LS-SVM untuk ketiga metode kernel. Hyperplane yang dihasilkan setiap model ditunjukkan oleh Gambar pada Lampiran 1. Gambar 5.3 menunjukkan bahwa ukuran step $\Delta\omega_{m(i)}$ dari output LS-SVM bervariasi pada nilai -1.5 rpm sampai 1.5 rpm. Hasil training LS-SVM terdiri dari tiga jenis, yaitu data yang terklasifikasi dengan benar pada kelasnya,

data yang terklasifikasi pada kelas lain dan data yang tidak terklasifikasi dalam kelas apapun (*misclass*). Data *misclass* pada Gambar 5.3 dipresentasikan oleh nilai -1.6 pada kelas negatif dan 1.6 pada kelas positif. Hasil training ketiga model LS-SVM dievaluasi dengan asesmen akurasi menggunakan matrik konfusi, yang terdiri dari *user accuracy*, *producer accuracy* dan *overall accuracy*. Model LS-SVM dengan *overall accuracy* tertinggi dipilih untuk algoritma MPPT.

Berdasarkan hasil training LS-SVM yang ditunjukkan oleh Gambar 5.3(a) dan matrik konfusi pada Table 2.1 Lampiran 2, model LS-SVM dengan RBF kernel dapat mengklasifikasi data dengan benar sebanyak 2668 sampel atau memiliki *overall accuracy* sebesar 97.19%. Model LS-SVM dengan RBF kernel dapat mengklasifikasi semua data input, sehingga memiliki data *misclass* nol sampel (0%). Berdasarkan Gambar 5.3(b) dan Tabel 2.2 pada Lampiran 2, model LS-SVM dengan Polynomial kernel dapat mengklasifikasi data dengan benar sebanyak 2314 sampel atau memiliki *overall accuracy* sebesar 84.3%, sedangkan data yang tidak terklasifikasi hanya 7 sampel (0.3%). Berdasarkan Gambar 5.3(c) dan Tabel 2.3 pada Lampiran 2, hasil training model LS-SVM dengan linear kernel hanya dapat mengklasifikasi data dengan benar sebanyak 1638 sampel atau memiliki *overall accuracy* hanya sebesar 59.67%, sedangkan data yang tidak terklasifikasi mencapai 66 sampel (2.4%).

Berdasarkan *overall accuracy* dari ketiga model LS-SVM, model yang menggunakan RBF kernel memberikan hasil yang lebih baik dari model lain. Model LS-SVM dengan RBF kernel juga menghasilkan *user accuracy* dan *producer accuracy* yang lebih tinggi dibandingkan model lain, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.4.

Gambar 5.4 menunjukan bahwa model LS-SVM dengan RBF kernel dapat menghasilkan *producer accuracy* dan *user accuracy* 100% pada beberapa kelas data. Model LS-SVM dengan RBF kernel memiliki *user accuracy* terendah hanya 80% dan *producer accuracy* terendah hanya 75% . Kondisi ini berbeda dengan model LS-SVM yang menggunakan polynomial dan linear kernel yang memiliki *user accuracy* dan *producer accuracy* terendah 0%. Hal ini menunjukan bahwa ada beberapa kelas data yang tidak terklasifikasi pada model LS-SVM dengan polynomial dan linear kernel, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.4.

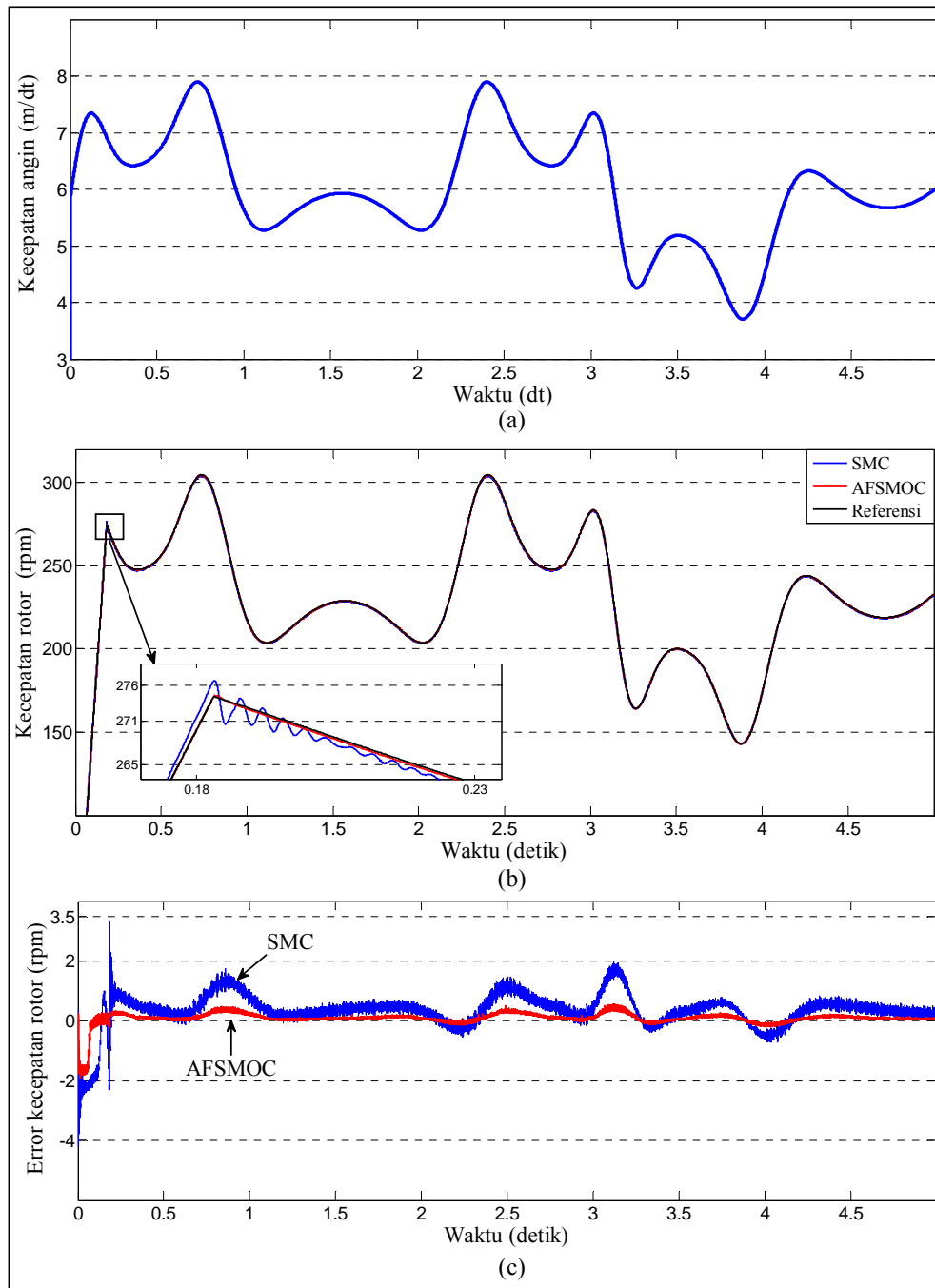


Gambar 5.4 Akurasi multiclass LS-SVM. (a) Producer accuracy, (b) user Accuracy

Berdasarkan asesmen akurasi, model LS-SVM dengan RBF kernel memiliki akurasi tertinggi dalam semua asesmen akurasi, sehingga dipilih sebagai model LS-SVM untuk algoritma MPPT.

5.3 Hasil Simulasi Kontroller Kecepatan dengan Metode AFSMOC

Bagian ini menjelaskan hasil simulasi kontroller kecepatan PMSG menggunakan AFSMOC. Untuk melihat kehandalan kontroller AFSMOC, maka hasil simulasinya dibandingkan dengan kontroller SMC standar. Kedua kontroller diuji dengan kecepatan angin yang bervariasi, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.5(a). Dalam simulasi ini, kecepatan referensi PMSG dihitung dengan Persamaan (2-17). Gambar 5.5 menunjukkan respon kedua kontroler.



Gambar 5.5 Hasil simulasi kontroler kecepatan PMSG
(a) Kecepatan angin, (b) respon kecepatan PMSG, (c) error kecepatan PMSG

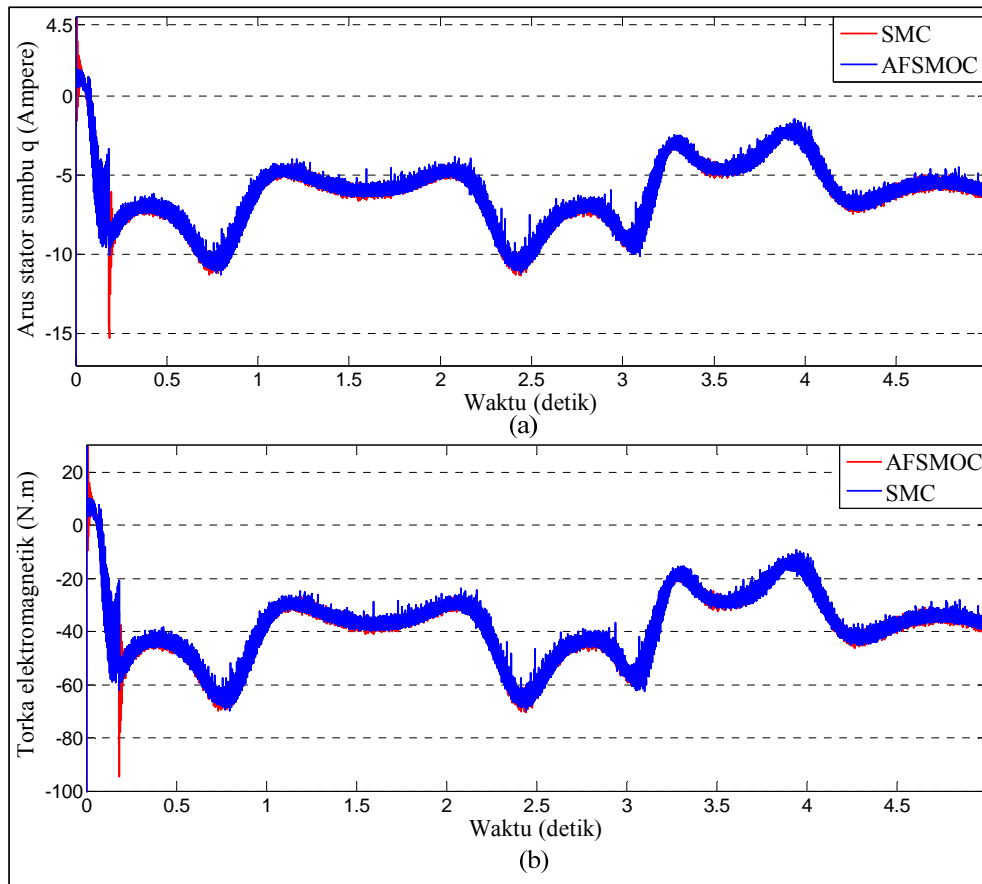
Hasil simulasi pada Gambar 5.5 menunjukkan bahwa respon kecepatan PMSG dari kontroler AFSMOC lebih bagus dibandingkan kontroler SMC. Kontroler AFSMOC mampu mempercepat kecepatan PMSG mencapai titik

referensi pada kondisi transien dan juga mampu meredam riak kecepatan pada kondisi tunak, sehingga responnya lebih halus di sekitar kecepatan referensi, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.5(b).

Kehandalan kontroller AFSMOC dalam mengendalikan kecepatan PMSG dapat dilihat dari error kecepatan yang ditunjukkan oleh Gambar 5.5(c). Pada kondisi transien, kontroller AFSMOC mampu meredam error maksimum kecepatan dari 3.5 rpm pada kontroller SMC menjadi 0.4 rpm. Kondisi ini terjadi pada waktu 0.16 detik dengan kecepatan referensi 275 rpm. Dengan kata lain, kontroller AFSMOC mampu meredam error maksimum kecepatan dari 1.27% pada SMC menjadi 0.14%. Kehandalan AFSMOC juga dapat dilihat pada kondisi tunak. Kecepatan PMSG pada kontroler AFSMOC dapat mengikuti kecepatan referensi pada setiap perubahan kecepatan angin dengan error maksimum 0.4 rpm, sedangkan kontroler SMC memberikan error maksimum 2 rpm. Gambar 5.5(c) juga menunjukkan bahwa error kecepatan PMSG cenderung bernilai positif. Hal ini disebabkan oleh kecepatan referensi yang diperoleh dari Persamaan (2-17) selalu berubah akibat perubahan kecepatan angin, sehingga kecepatan rotor selalu tertinggal dari kecepatan referensi.

Kendali kecepatan PMSG dirancang dengan metode FOC berbasis sudut torka konstan. Dalam metode ini, kecepatan PMSG dikendalikan hanya dengan mengatur torka melalui arus stator sumbu q (i_q) menggunakan AFSMOC atau SMC, sedangkan komponen fluksi atau arus stator sumbu d (i_d) dibuat konstan nol. Kehandalan kontroler AFSMOC dan SMC dalam mengendalikan kecepatan PMSG juga dapat dilihat dari grafik torka elektromagnetik dan arus stator sumbu q referensi i_q^* yang menjadi objek kontrol dari AFSMOC dan SMC. Gambar 5.6 menunjukkan respon torka elektromagnetik dan i_q^* dari kedua kontroler.

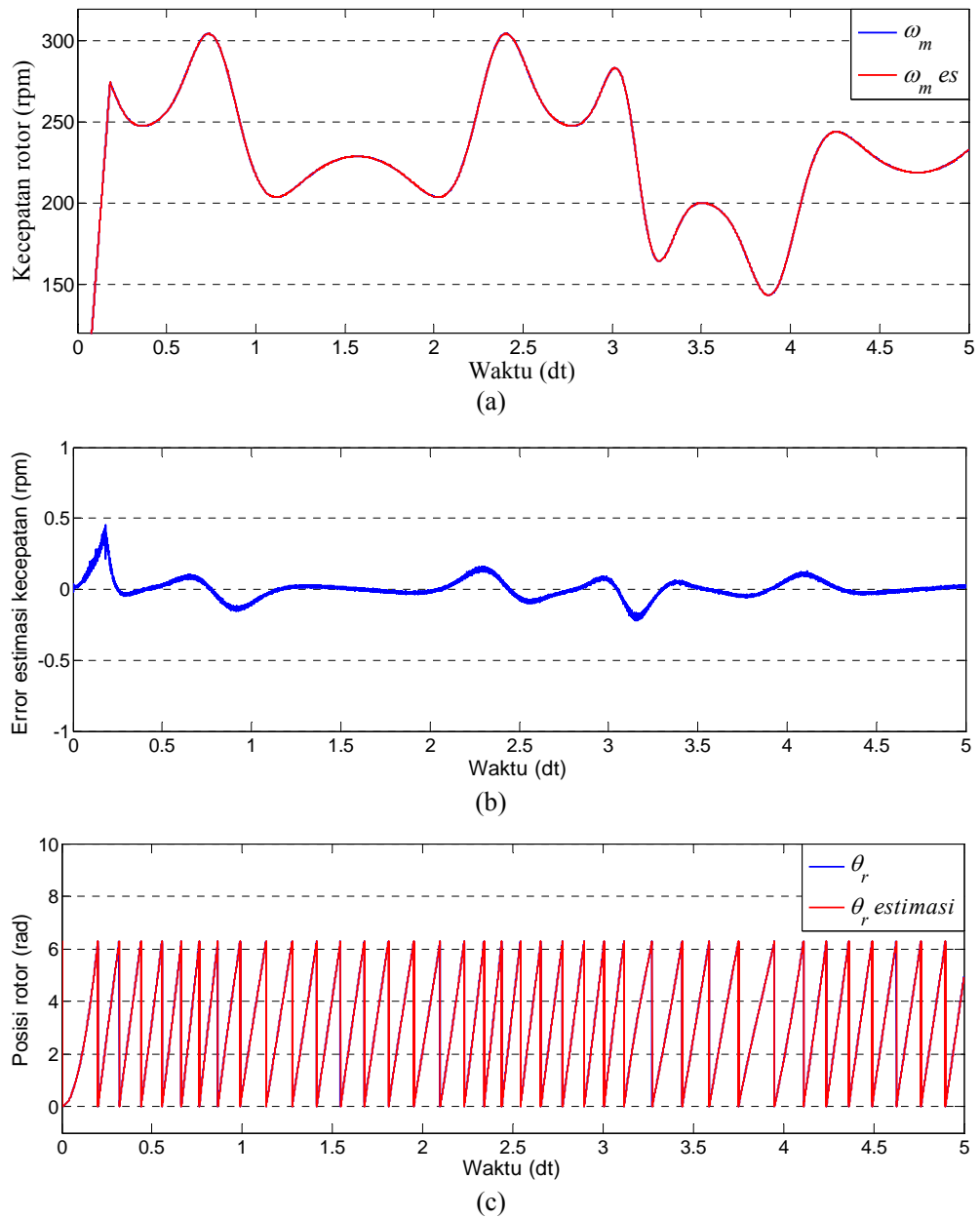
Gambar 5.6(a) menunjukkan bahwa respon i_q^* dari kontrol AFSMOC lebih bagus dibandingkan SMC. Kontroler AFSMOC mampu meredam lonjakan arus i_q^* pada kondisi transien akibat gangguan eksternal, yaitu perubahan kecepatan angin. Hal ini membuat respon torka elektromagnetik dari kontroler AFSMOC juga lebih halus dibandingkan SMC, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.6(b). Kontroler AFSMOC juga mampu meredam riak i_q^* pada kondisi tunak, sehingga riak torka elektromagnetik juga dapat diminimalisir.



Gambar 5.6 Output kontroler kecepatan PMSG
a) Arus stator sumbu q , b) Torka elektromagnetik

Berdasarkan Gambar 5.5 dan 5.6 dapat disimpulkan bahwa kontroler AFSMOC lebih handal dibandingkan SMC dalam mengendalikan kecepatan PMSG. Hal ini menunjukkan bahwa desain penguat adaptif menggunakan T2FS yang dirancang pada AFSMOC telah mampu meningkatkan kehandalan kontroler dalam mengendalikan kecepatan PMSG. Berdasarkan hasil yang diperoleh dalam simulasi ini, maka kontroler AFSMOC dipilih sebagai kontroler kecepatan PMSG untuk kendali daya maksimum dalam simulasi berikutnya.

Kesuksesan kontroler kecepatan dalam mengendalikan kecepatan PMSG tidak terlepas dari keakuratan MRAS observer dalam memberikan informasi kecepatan rotor yang dibutuhkan oleh kontroler kecepatan. Gambar 5.7 menunjukkan hasil estimasi kecepatan dan posisi rotor PMSG dari MRAS observer untuk model yang menggunakan kontroler AFSMOC.



Gambar 5.7 Performansi MRAS observer. (a) Estimasi kecepatan rotor, (b) error estimasi kecepatan rotor, (c) estimasi posisi rotor

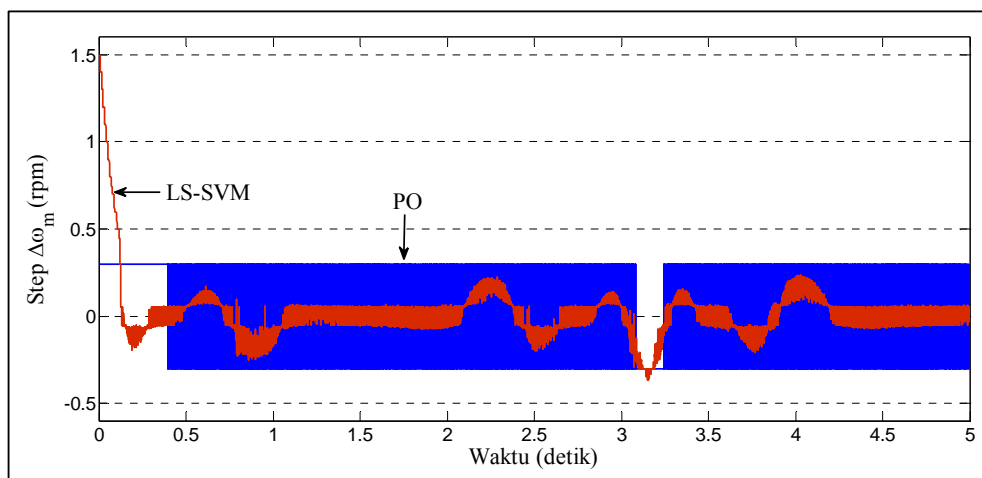
Gambar 5.7(a) menunjukkan bahwa kecepatan rotor hasil estimasi MRAS observer dapat mengikuti kecepatan terukur. Error maksimum kecepatan hasil estimasi hanya 0.4 rpm, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.7(b). MRAS observer juga telah memberikan informasi posisi rotor yang akurat, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.7(c).

Hal ini menunjukkan bahwa rancangan MRAS observer dengan dengan model arus stator pada Gambar 4.6 memberikan hasil yang baik, sehingga kontroler kecepatan dapat bekerja dengan baik pula. Posisi rotor θ_r hasil estimasi ini ditransformasikan menjadi posisi elektrik θ_e yang digunakan untuk transformasi Park dan Clark pada model yang terdapat dalam Gambar 4.1.

5.4 Hasil Simulasi Algoritma MPPT

Bagian ini menguraikan hasil simulasi algoritma MPPT menggunakan multiclass LS-SVM untuk mendapatkan daya output maksimum pada setiap variasi kecepatan angin. Untuk melihat kehandalan algoritma LS-SVM, hasil simulasinya dibandingkan dengan hasil simulasi dari algoritma PO. Kedua algoritma MPPT menggunakan kontroller AFSMOC sebagai pengatur kecepatan PMSG.

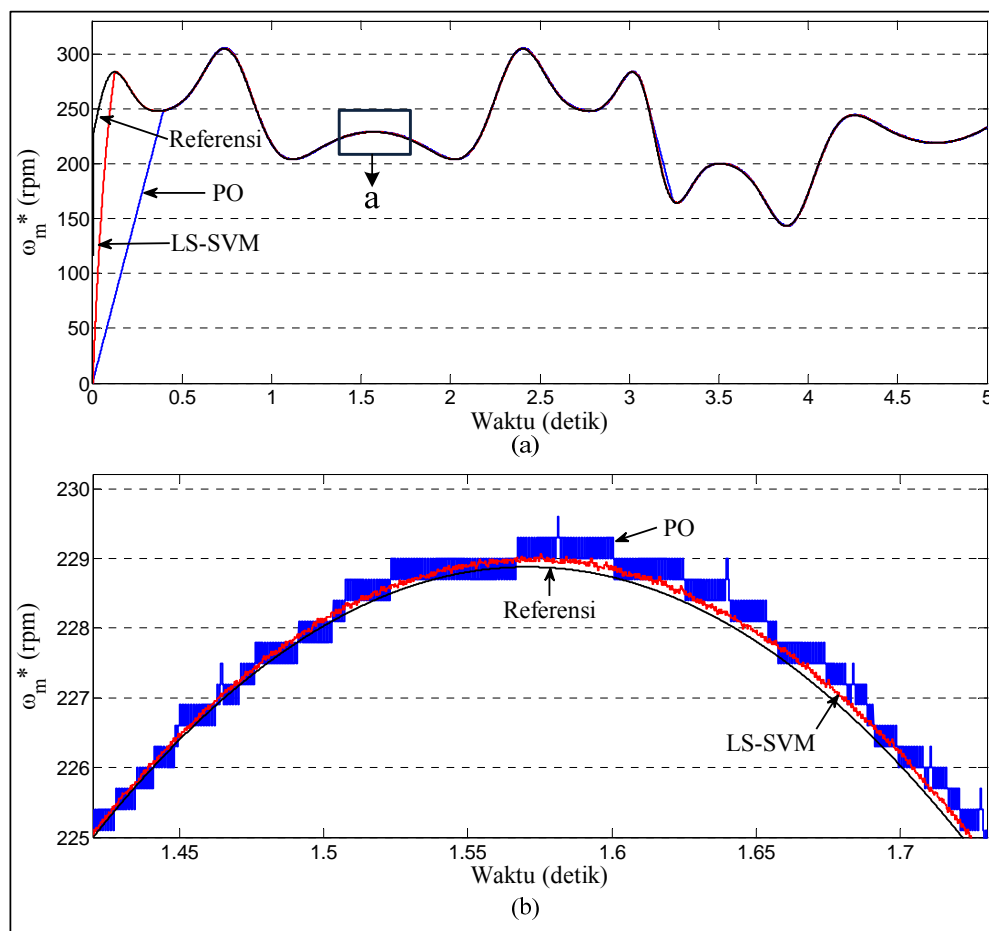
Kedua algoritma MPPT ini digunakan untuk mencari kecepatan referensi generator pada titik daya maksimum. Algoritma PO menggunakan nilai step $\Delta\omega_m$ konstan 0.3 rpm, sedangkan algoritma LS-SVM memiliki nilai step yang bervariasi sebanyak 35 variasi mulai -1.5 rpm sampai 1.5 rpm. Gambar 5.8 menunjukkan respon nilai step $\Delta\omega_m$ dari kedua algoritma MPPT ketika diuji dengan kecepatan angin bervariasi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.5(a).



Gambar 5.8 Ukuran step algoritma MPPT

Gambar 5.8 menunjukkan bahwa ukuran step dari algoritma LS-SVM bernilai maksimum 1.5 rpm pada kondisi awal dan nilainya berubah sampai mencapai titik nol, sedangkan ukuran step PO bernilai konstan 0.3 rpm. Ketika mencapai titik nol, ukuran step dari LS-SVM berada pada nilai minimum, yaitu ± 0.05 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan referensi sedang berada pada titik daya maksimum. Kondisi ini berbeda dengan algoritma PO yang nilai stepnya konstan ± 0.3 rpm di sekitar titik daya maksimum.

Tujuan desain ukuran step yang bervariasi adalah untuk meningkatkan kinerja algoritma MPPT, yaitu mempercepat respon kecepatan referensi mencapai titik maksimum dan meminimalisir riak kecepatan di sekitar titik daya maksimum. Gambar 5.9 menunjukkan respon kecepatan referensi dari kedua algoritma MPPT.

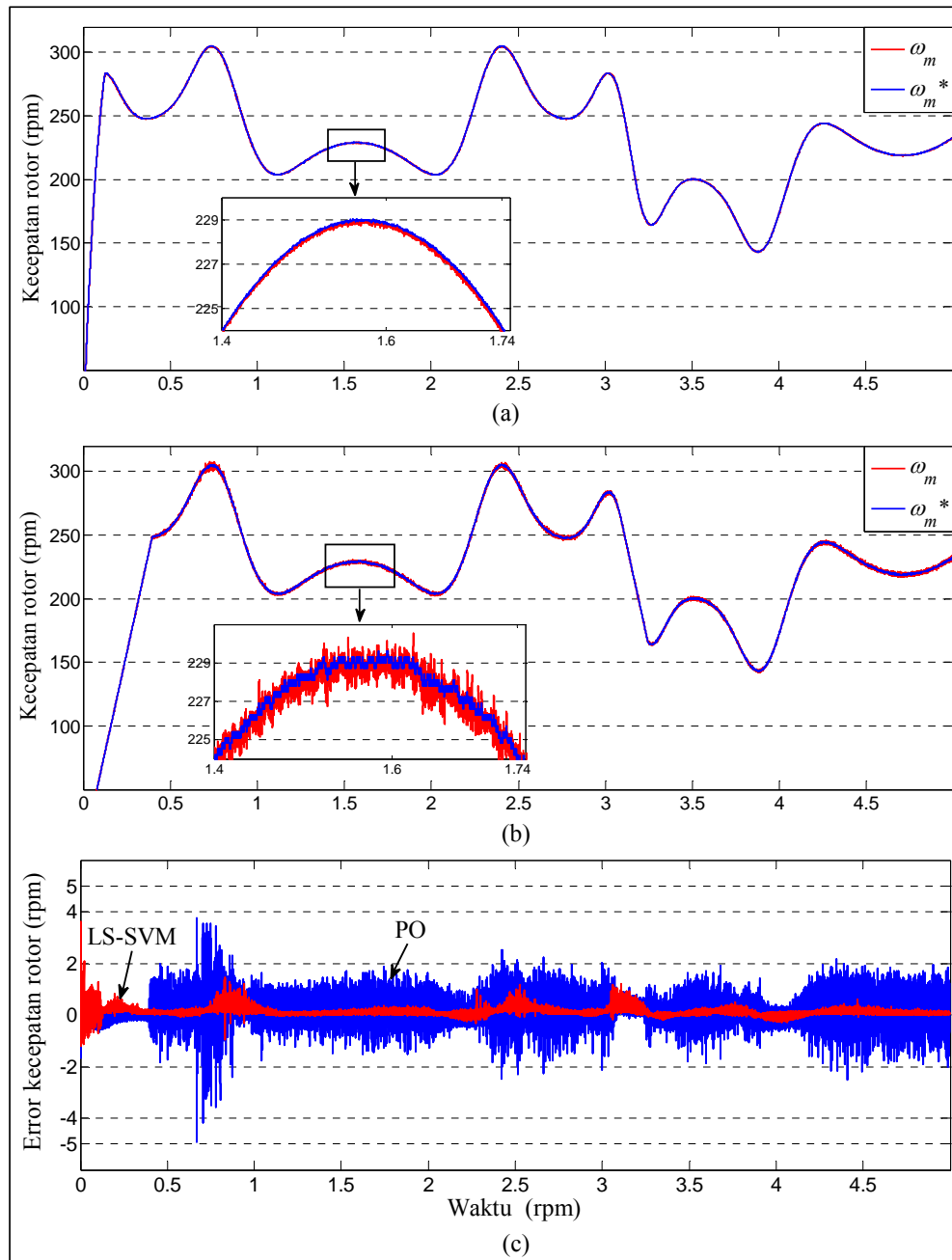


Gambar 5.9 Output algoritma MPPT. (a) Kecepatan referensi, (b) zoom bagian a

Variasi ukuran step dari algoritma LS-SVM membuat kecepatan referensi lebih cepat mencapai titik maksimum, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.9(a). Pada kondisi awal, kecepatan referensi ω_m^* dari algoritma LS-SVM dapat mencapai titik maksimum dalam 0.1 detik, sedangkan kecepatan referensi dari algoritma PO membutuhkan waktu 0.41 detik mencapai titik daya maksimum. Hal ini juga dapat dilihat pada saat terjadi penurunan kecepatan angin secara ekstrim dari 7.2 m/dt menjadi 4.2 m/dt pada waktu simulasi 3 detik. Ukuran step yang bervariasi dari algoritma LS-SVM dapat meminimalisir error kecepatan referensi saat terjadi perubahan kecepatan angin secara ekstrim. Hal ini disebabkan oleh nilai step yang dihasilkan algoritma LS-SVM menjadi lebih besar saat terjadi perubahan kecepatan angin secara ekstrim, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.8. Ukuran step yang konstan ± 0.3 rpm dari algoritma PO membuat kecepatan referensi lari dari titik daya maksimum saat terjadi perubahan kecepatan angin yang ekstrim, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.9(a). Hal ini menunjukkan bahwa nilai step sebesar 0,3 rpm pada algoritma PO tidak akurat lagi ketika kecepatan angin berubah secara ekstrim.

Ukuran step yang bervariasi dari algoritma LS-SVM juga telah mampu meminimalisir riak kecepatan referensi pada titik maksimum, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.9(b). Kecepatan referensi dari algoritma LS-SVM memiliki riak sebesar nilai minimum ukuran step, yaitu ± 0.05 rpm, sedangkan kecepatan referensi dari algoritma PO memiliki riak konstan sebesar ukuran step algoritma PO, yaitu ± 0.3 rpm. Riak kecepatan referensi ini akan berdampak pada respon kontroler kecepatan dan daya output generator. Gambar 5.9 menunjukkan bahwa variasi nilai $\Delta\omega_m$ yang dihasilkan algoritma LS-SVM telah dapat meningkatkan kinerja algoritma MPPT. Algoritma LS-SVM telah dapat mempercepat kecepatan referensi mencapai titik maksimum dan juga telah berhasil meminimalisir riak kecepatan referensi di sekitar titik daya maksimum.

Kinerja sistem kendali MPPT tidak hanya tergantung pada algoritma MPPT, tetapi juga ditentukan oleh kinerja kontroler kecepatan. Dalam simulasi ini, kecepatan PMSG dikendalikan dengan metode AFSMOC agar sesuai dengan kecepatan referensi yang dihasilkan oleh kedua algoritma MPPT. Gambar 5.10 menunjukkan respon kontroler AFSMOC dalam mengendalikan kecepatan PMSG.



Gambar 5.10 Kecepatan rotor PMSG
(a) Algoritma LS-SVM, (b) algoritma PO, (c) error kecepatan rotor

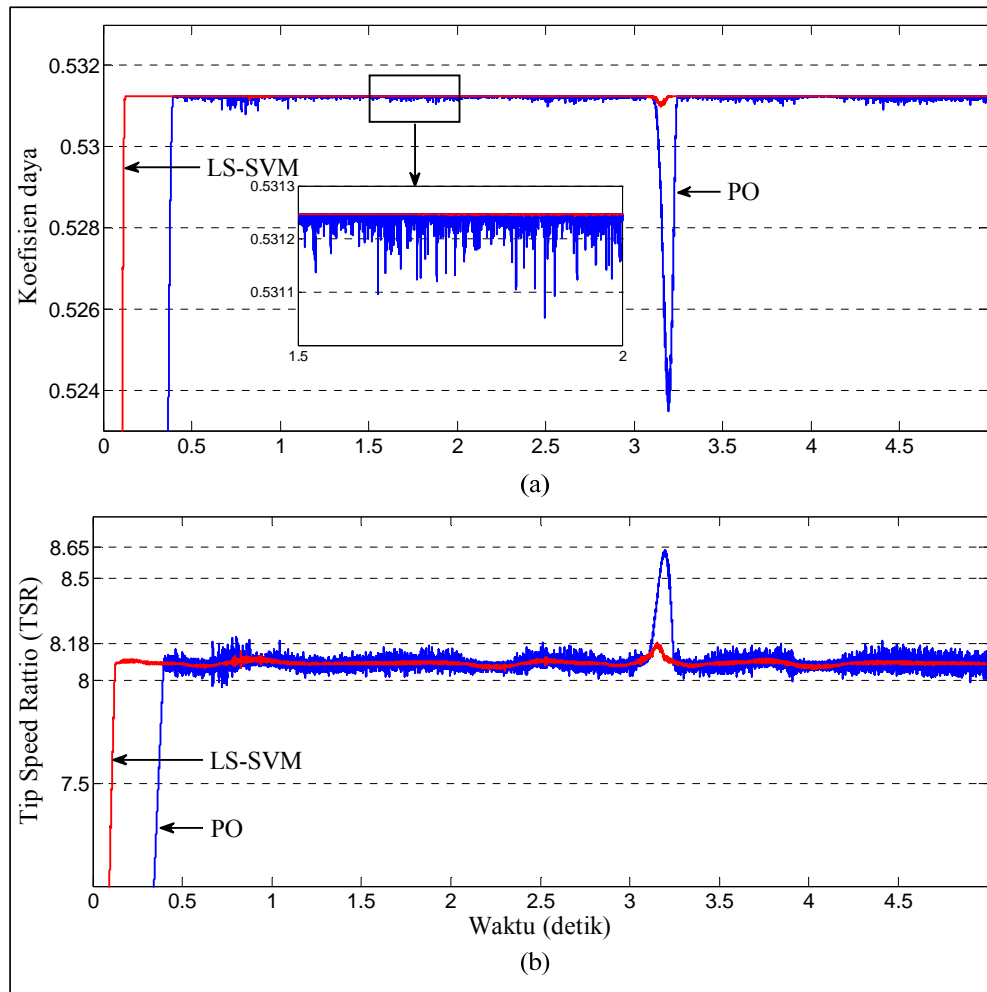
Gambar 5.10 menunjukkan bahwa kemampuan kontroler AFSMOC dalam mengendalikan kecepatan PMSG telah memberikan performansi yang bagus untuk kedua algoritma MPPT, dimana kecepatan generator dapat mengikuti

kecepatan referensi dari kedua algoritma MPPT. Kecepatan referensi yang dihasilkan algoritma LS-SVM memiliki riak yang lebih halus dibandingkan algoritma PO. Hal ini membuat kecepatan generator pada algoritma LS-SVM juga memiliki riak yang lebih halus dibandingkan algoritma PO, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.10(a) dan 5.10(b). Walaupun riak kecepatan referensi dari algoritma PO cukup besar, namun kecepatan generator tetap dapat mengikutinya. Hal ini menunjukkan bahwa kontroler AFSMOC cukup handal dalam mengendalikan kecepatan generator. Pada kondisi tunak, error maksimum kecepatan generator hanya 2 rpm pada algoritma PO dan 1 rpm pada algoritma LS-SVM, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.10(c). Berdasarkan hasil ini dapat disimpulkan bahwa kontroler AFSMOC sudah sangat memadai digunakan untuk mengendalikan kecepatan generator pada sistem kendali MPPT dalam model ini.

Hasil simulasi algoritma MPPT dan kontroler kecepatan telah memberikan respon yang bagus untuk sistem kendali MPPT. Algoritma MPPT dengan metode LS-SVM telah dapat menghasilkan kecepatan referensi di sekitar titik daya maksimum. Kontroler AFSMOC juga telah dapat mengendalikan kecepatan generator sesuai dengan kecepatan referensi, sehingga tujuan sistem kendali MPPT untuk mendapatkan daya maksimum dapat dicapai.

Pembangkit listrik tenaga angin dapat dikatakan beroperasi pada daya output maksimum jika koefisien daya turbin angin berada pada titik maksimum dan nilai TSRnya berada pada titik optimum. Turbin angin yang dirancang dalam penelitian ini memiliki koefisien daya maksimum 0.53125.

Respon koefisien daya dari kedua algoritma MPPT ditunjukkan oleh Gambar 5.11(a). Koefisien daya dari algoritma LS-SVM lebih stabil berada di sekitar titik koefisien daya maksimum C_{p_max} dibandingkan algoritma PO. Algoritma PO memiliki nilai koefisien daya minimum sebesar 0.5235 atau dengan kata lain memiliki error maksimum koefisien daya sebesar 0.00775 (1.46%), sedangkan nilai minimum koefisien daya dari algoritma LS-SVM hanya 0.531 atau memiliki error maksimum koefisien daya hanya 0.00025 (0.047%). Kondisi ini terjadi saat kecepatan angin berubah secara ekstrim dari 7.2 m/dt menjadi 4.2 m/dt pada waktu simulasi 3.1 detik, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.11(a).



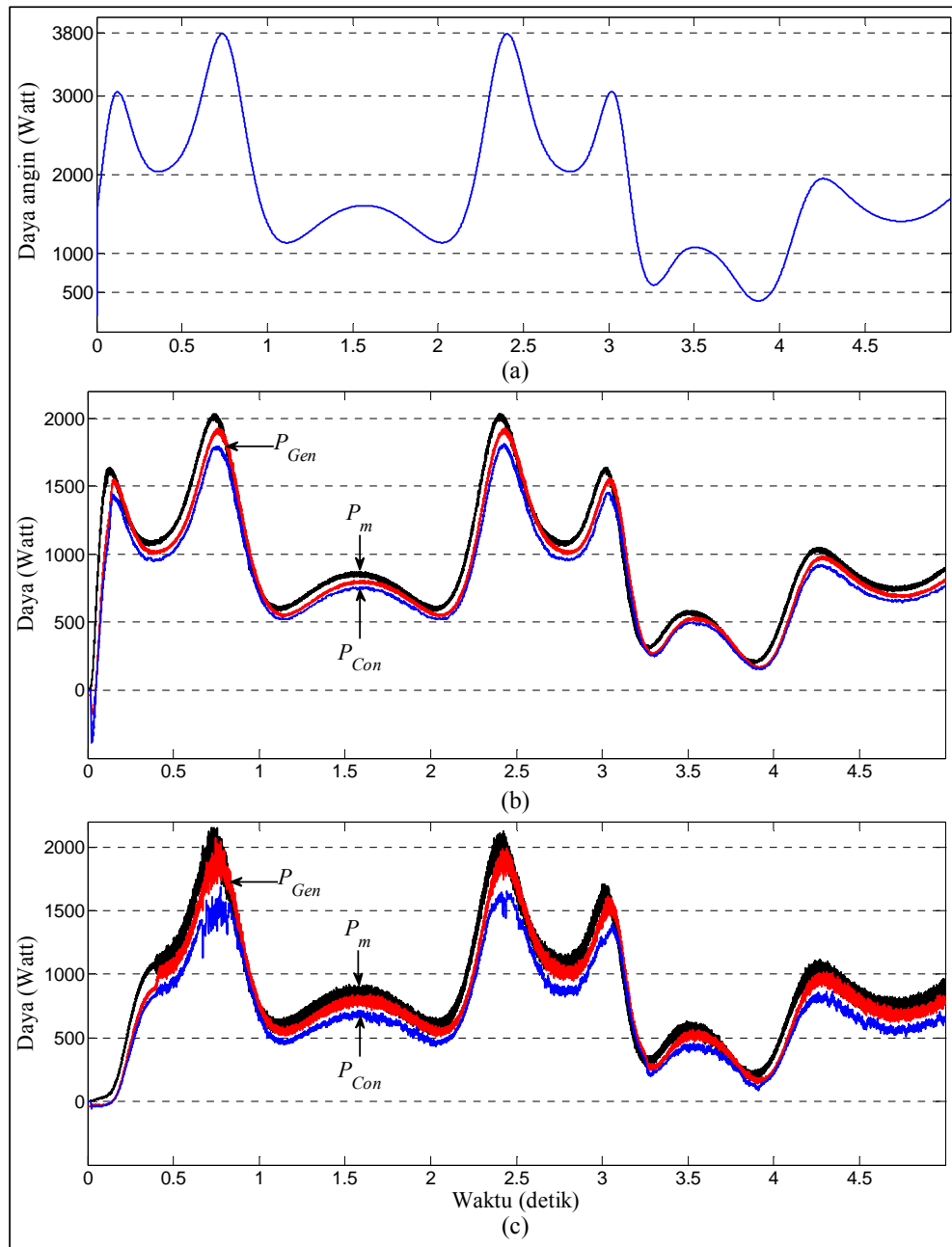
Gambar 5.11 Performansi sistem kendali MPPT pada sisi turbin angin. (a) Koefisien daya, (b) Tip Speed Ratio (TSR) turbin angin

Gambar 5.11(a) juga menunjukkan bahwa koefisien daya dari algoritma PO memiliki riak yang lebih besar dibandingkan algoritma LS-SVM ketika berada di sekitar nilai maksimum. Hal ini dipengaruhi oleh ukuran step dari kedua algoritma MPPT. Berdasarkan Gambar 5.9, ukuran step yang dihasilkan algoritma LS-SVM lebih kecil dibandingkan algoritma PO ketika berada di sekitar titik daya maksimum, sehingga riak kecepatan referensinya juga menjadi lebih kecil dibandingkan algoritma PO. Kondisi ini juga membuat riak koefisien daya dari model yang menggunakan algoritma LS-SVM lebih kecil dibandingkan model yang menggunakan algoritma PO.

Kinerja sistem kendali MPPT juga dapat dilihat dari respon TSR turbin angin. Daya output generator dapat dikatakan maksimum jika nilai TSR turbin angin berada pada nilai optimum. Model turbin angin yang digunakan dalam simulasi ini memiliki nilai TSR optimum sebesar 8.09, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.1(c).

Gambar 5.11(b) menunjukkan respon TSR turbin angin dari kedua algoritma MPPT. Gambar 5.11(b) menunjukkan bahwa kedua algoritma MPPT telah menghasilkan nilai TSR di sekitar nilai optimum walaupun kecepatan angin berubah-ubah dimana nilai TSR dari algoritma LS-SVM lebih stabil berada di sekitar titik optimum dibandingkan algoritma PO. Pada model yang menggunakan algoritma PO, nilai maksimum TSR melonjak mencapai 8.65 ketika terjadi perubahan kecepatan angin secara drastis waktu 3.1 detik. Dengan kata lain, model yang menggunakan algoritma PO memiliki error maksimum TSR sebesar -0.56 (6.92%). Pada model yang menggunakan algoritma LS-SVM, lonjakan nilai TSR hanya mencapai 8.18 atau memiliki error maksimum TSR sebesar -0.09 (1.1%). Hal ini menunjukkan bahwa ukuran step yang bervariasi pada algoritma LS-SVM dan kehandalan kontroler AFSMOC dalam mengendalikan kecepatan PMSG telah mampu mereduksi error maksimum TSR dari 6.15% pada algoritma PO menjadi 1.1%. Gambar 5.11(b) juga menunjukkan bahwa riak TSR dari algoritma PO lebih besar dibandingkan riak TSR dari algoritma LS-SVM ketika berada di sekitar titik optimum. Kondisi ini menunjukkan bahwa ukuran step yang bervariasi pada algoritma LS-SVM juga telah mampu mereduksi riak TSR pada titik optimum.

Tujuan sistem kendali MPPT adalah untuk mendapatkan daya output generator maksimum pada setiap variasi kecepatan angin. Gambar 5.12 menunjukkan respon daya pembangkit listrik tenaga angin yang dihasilkan oleh sistem kendali MPPT pada kedua algoritma MPPT. Gambar 5.12(a) menunjukkan daya angin yang ditangkap turbin. Pada saat kecepatan angin maksimum 7.9 m/dt, turbin angin dapat menangkap daya angin P_w sebesar 3800 watt. Besaran daya angin yang ditangkap turbin angin ini dipengaruhi oleh jari-jari sudu turbin dan densitas udara. Daya angin ini dikonversikan oleh turbin angin menjadi daya mekanik P_m yang besarnya ditentukan oleh koefisien daya turbin angin.



Gambar 5.12 Daya pembangkit listrik tenaga angin. (a) Daya angin
(b) daya pada model algoritma LS-SVM, (c) Daya pada model algoritma PO

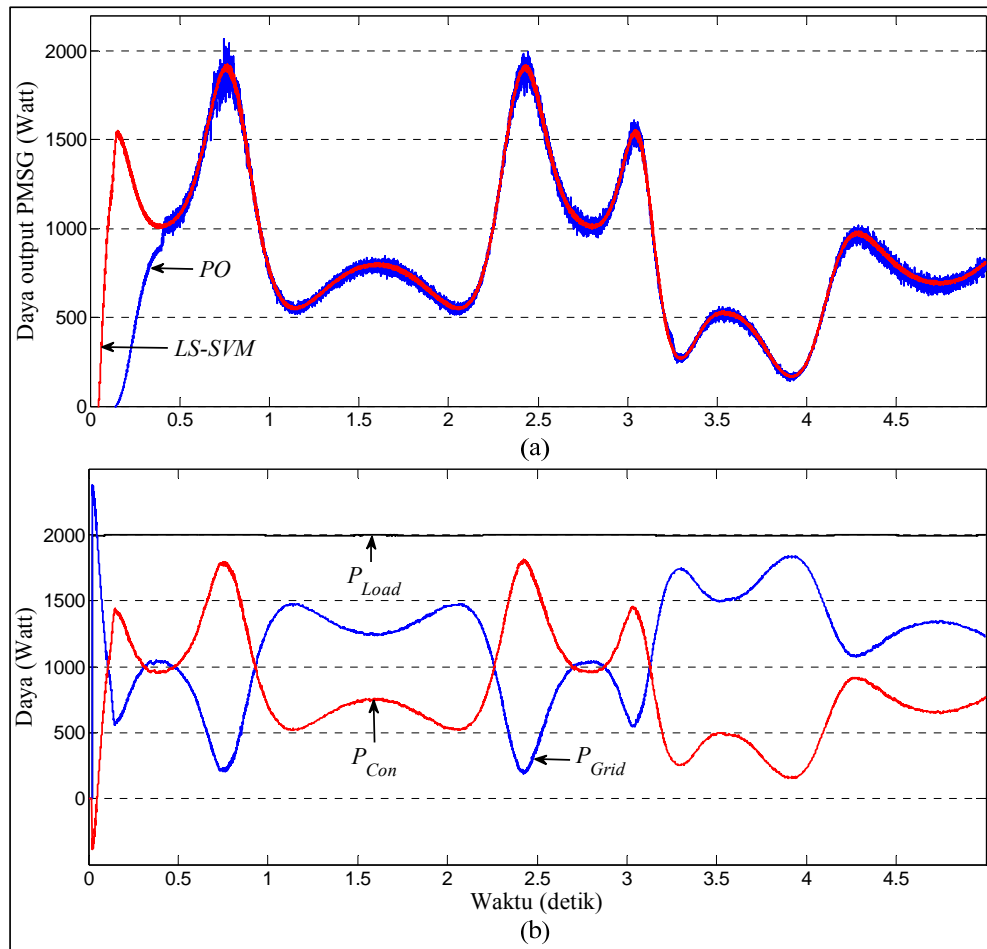
Gambar 5.12(b) menunjukkan respon daya dari model yang menggunakan algoritma LS-SVM dan Gambar 5.12(c) menunjukkan respon daya dari model yang menggunakan algoritma PO. Saat kecepatan angin 7.9 m/dt, turbin angin menghasilkan daya mekanik sekitar 2000 Watt. Berdasarkan nilai P_w dan P_m pada

saat kecepatan angin 7.9 m/dt, diperoleh efisiensi turbin angin sebesar 0.53. Nilai ini sama dengan nilai koefisien daya maksimum turbin angin. Hal ini menunjukkan bahwa pembangkit listrik tenaga angin beroperasi disekitar titik daya maksimum.

Daya mekanik yang dihasilkan turbin ini dikonversikan menjadi daya listrik oleh PMSG dan disalurkan ke grid melalui VSMC. Pada saat kecepatan angin 7.9 m/dt, PMSG menghasilkan daya output P_{Gen} sebesar 1900 Watt, dan VSMC mengalirkan daya ke grid P_{Con} sebesar 1780 Watt. Sehingga dapat disimpulkan bahwa PMSG memiliki efisiensi sebesar 0.95 dan VSMC memiliki efisiensi sebesar 0.94 pada saat turbin angin beroperasi pada kecepatan angin maksimum 7.9 m/dt. Efisiensi PMSG dan VSMC ini dipengaruhi oleh kecepatan angin dan parameter PMSG dan VSMC. Hal ini dapat dilihat pada saat kecepatan angin mengalami penurunan pada waktu 3.1 detik. Pada kondisi ini, daya output generator lebih besar dari daya mekanik turbin angin. Hal ini diakibatkan oleh parameter momen inersia turbin angin yang melepaskan daya dorong pada saat terjadi penurunan kecepatan putaran generator.

Gambar 5.12(b) dan 5.12(c) juga menunjukkan bahwa daya output generator yang dihasilkan algoritma LS-SVM memiliki riak yang lebih halus dibandingkan daya output dari algoritma PO. Hal ini menunjukkan bahwa variasi ukuran step dari algoritma LS-SVM telah mampu meminimalisir riak daya di sekitar titik maksimum. Berdasarkan Gambar 5.9(a), variasi ukuran step dari algoritma LS-SVM membuat kecepatan referensi lebih cepat mencapai titik daya maksimum pada kondisi transien. Hal ini membuat daya output yang dihasilkan juga lebih besar dibandingkan algoritma PO, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.13(a).

Gambar 5.13 menunjukkan performansi daya pembangkit listrik tenaga angin. Gambar 5.13(a) menunjukkan daya output generator dari kedua algoritma MPPT. Berdasarkan Gambar 5.13(a) dapat disimpulkan bahwa desain algoritma MPPT dengan multiclass LS-SVM telah memberikan hasil yang sesuai dengan target penelitian. Variasi ukuran step yang dirancang menggunakan algoritma multiclass LS-SVM telah dapat meminimalisir riak daya di sekitar titik maksimum dan juga telah dapat mempercepat respon daya output generator mencapai titik daya maksimum.



Gambar 5.13 Performansi daya pembangkit listrik tenaga angin. (a) Daya output PMSG dari kedua algoritma MPPT, (b) Aliran daya pembangkit listrik tenaga angin

Model pembangkit listrik tenaga angin yang dirancang dalam penelitian ini terhubung dengan grid dan menyuplai beban resistor 2 kW, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1. Gambar 5.13(b) menunjukkan aliran daya pembangkit listrik tenaga angin untuk model yang menggunakan algoritma LS-SVM, dimana beban P_{load} disuplai dari grid P_{grid} dan dari output konverter P_{con} .

Gambar 5.13(b) menunjukkan bahwa pada kondisi awal, P_{grid} lebih besar dari P_{load} , sedangkan P_{con} bernilai minus. Hal ini menunjukkan bahwa PMSG beroperasi dalam kondisi motoring. Pada kondisi ini, P_{grid} mengalir ke beban dan juga ke PMSG. Hal ini disebabkan oleh starting generator yang mengkonsumsi daya dari grid akibat pergerakan kecepatan referensi yang cepat mencapai titik

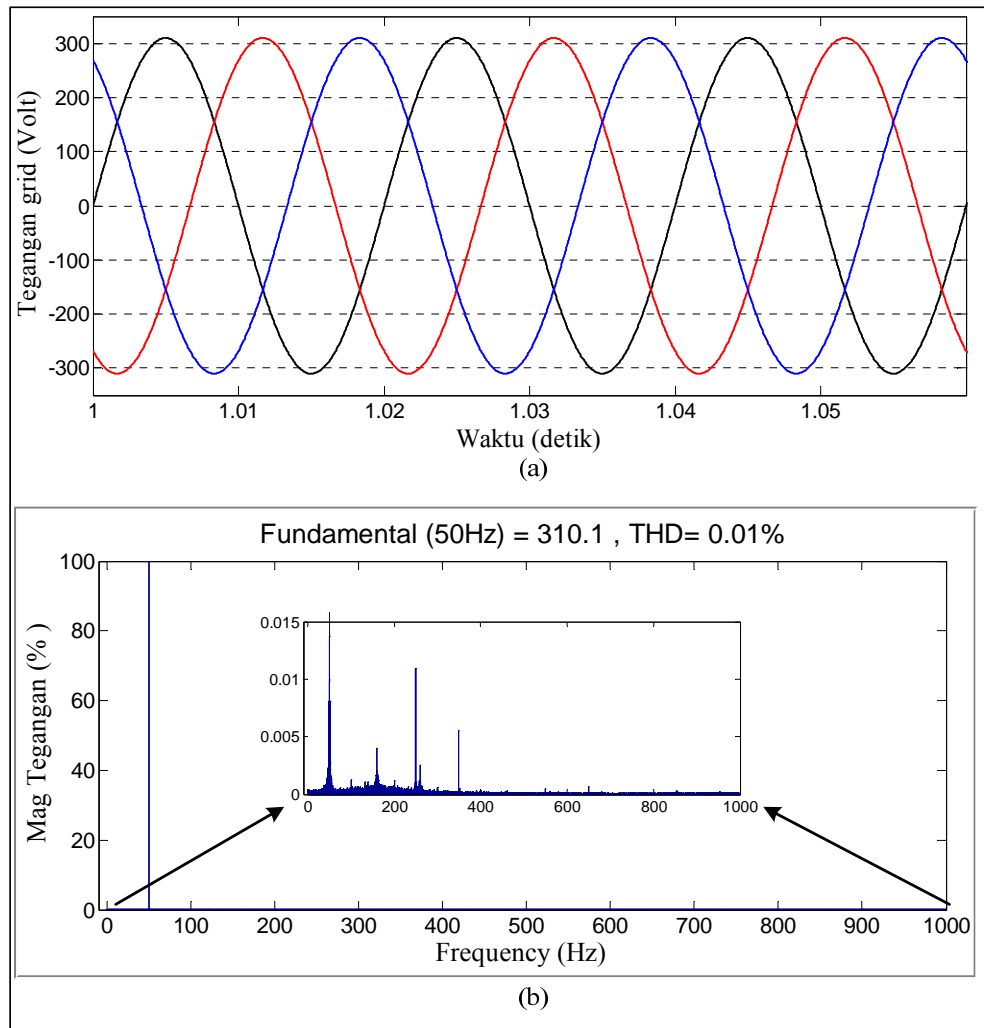
maksimum. Ukuran step yang besar pada algoritma LS-SVM pada kondisi awal mempercepat kecepatan referensi cepat mencapai titik maksimum, tapi hal ini juga menyebabkan daya yang dibutuhkan untuk mengendalikan kecepatan aktual mencapai kecepatan referensi juga lebih besar. Hal ini menjadi pertimbangan dalam menentukan batas maksimum ukuran step. Dalam penelitian ini nilai maksimum ukuran step dipilih sebesar 1.5 rpm.

Gambar 5.13(b) juga menunjukkan bahwa ketika P_{con} sudah bernilai positif, maka P_{grid} lebih kecil dari P_{load} . Kondisi ini mengindikasikan bahwa PMSG sudah beroperasi dalam kondisi generating. Dalam kondisi ini, beban disuplai dari generator melalui konverter P_{con} dan dari jala-jala P_{grid} . Jumlah P_{grid} yang mengalir ke beban berbanding terbalik dengan P_{con} , sedangkan besaran P_{con} ditentukan oleh kecepatan angin.

5.5 Performansi Very Sparse Matrix Converter

Tujuan dipilihnya Very Sparse Matrix Converter (VSMC) sebagai konverter daya untuk pembangkit listrik tenaga angin adalah untuk meningkatkan kualitas daya pembangkit. Salah satu kelemahan sistem yang menggunakan konverter daya adalah munculnya harmonisa yang cukup besar akibat pengaruh frekuensi switching konverter. VSMC adalah salah satu varian indirect matrix converter yang memiliki kualitas daya yang lebih baik dibandingkan back to back converter. Konverter ini dapat memberikan gelombang arus dan tegangan sinusoidal pada sisi input. Selain itu VSMC juga memiliki beberapa keuntungan lain, seperti tidak menggunakan dc link yang membutuhkan kapasitor ukuran besar serta memiliki jumlah switch aktif yang lebih sedikit dibandingkan matrix konverter lainnya. Untuk mengurangi harmonisa tegangan dan arus akibat frekuensi switching, maka pada sisi grid ditambahkan filter LC ukuran kecil.

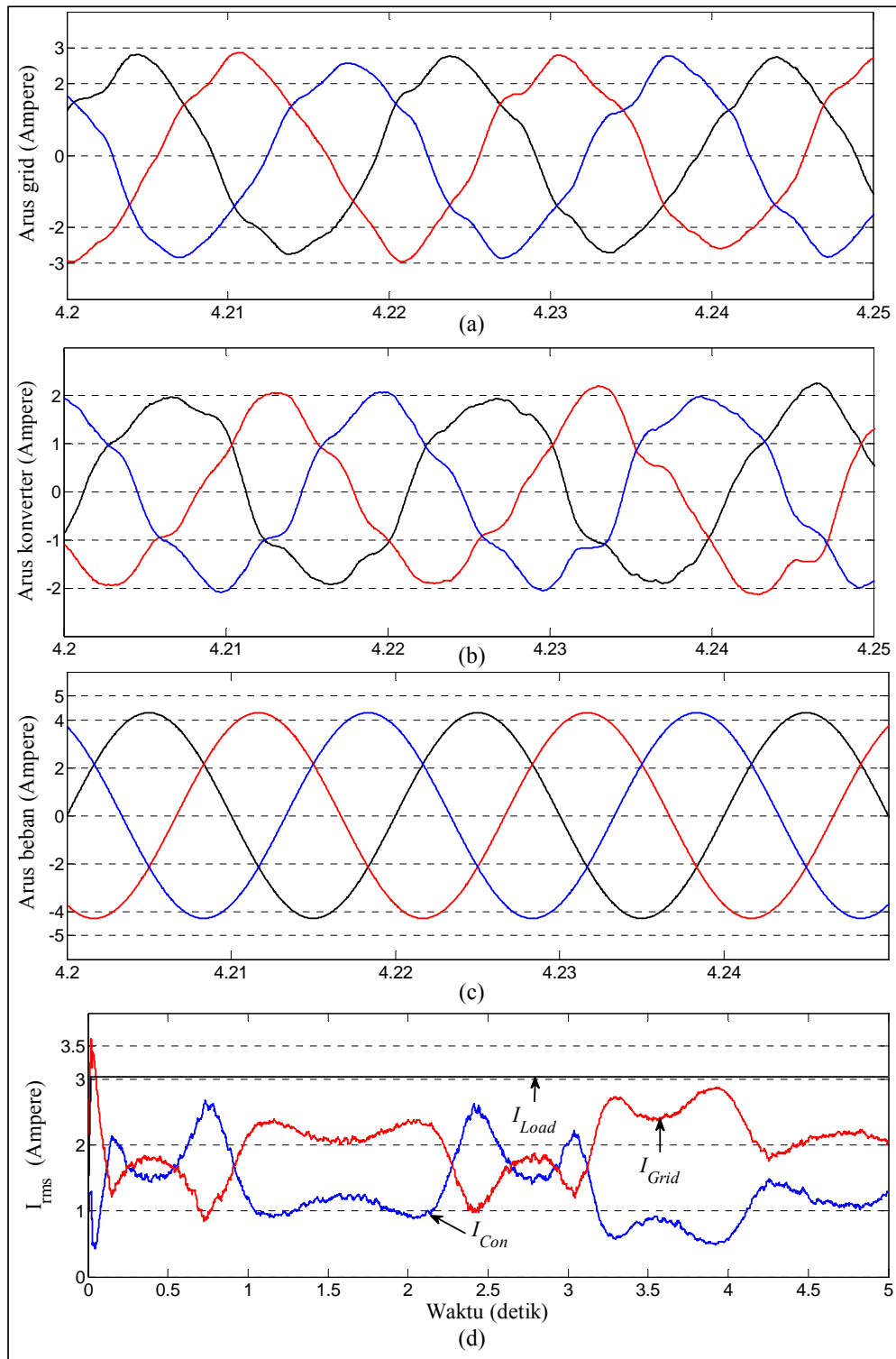
Tujuan penggunaan VSMC untuk meningkatkan kualitas daya pembangkit listrik tenaga angin telah diperoleh sesuai dengan perencanaan. Hal ini dapat dilihat dari performansi tegangan dan arus yang dihasilkan VSMC. Gambar 5.14 menunjukkan performansi tegangan grid yang diberikan VSMC.



Gambar 5.14 Tegangan grid. (a) gelombang tegangan grid, (b) THD tegangan grid.

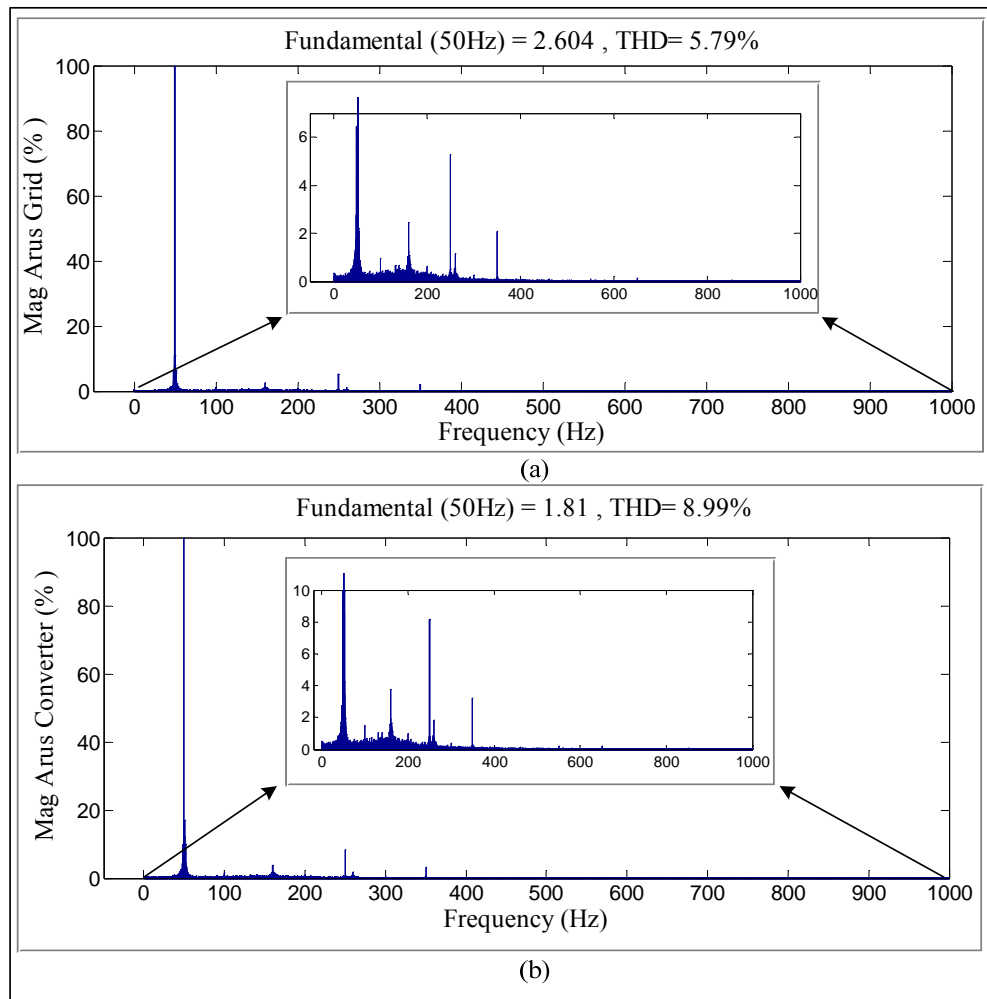
Gambar 5.14(a) menunjukkan gelombang tegangan grid dan Gambar 5.14(b) menunjukkan THD tegangan grid. Dengan menggunakan filter LC pada sisi grid, diperoleh tegangan grid sinusoidal dengan *Total Harmonic Distortion* (THD) untuk fasa *a* sebesar 0.01%, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.14(a) dan 5.14(b). THD tegangan grid yang diberikan VSMC ini sudah dibawah THD yang diizinkan dalam standar IEEE 159.

VSMC juga telah menghasilkan arus sinusoidal pada kedua sisi konverter. Performansi arus VSMC dapat dilihat pada Lampiran 3 dan Gambar 5.15 untuk waktu simulasi 4.2 detik dengan kecepatan angin 4.3 m/dt.



Gambar 5.15 Performansi arus VSMC, (a) Arus grid, (b) arus konverter, (c) arus beban, dan (d) arus rms pada fasa a

Gambar 5.15(a) dan 5.16(b) menunjukkan bahwa gelombang arus grid dan arus konverter mendekati bentuk sinusoidal dengan THD arus grid pada fasa a sebesar 5.79% dan THD arus konverter pada fasa a sebesar 8.99%, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.16(a) dan 5.16(b). Hal ini menunjukkan bahwa filter LC yang dipasang pada sisi grid telah dapat meminimalisir harmonisa arus dan tegangan akibat frekuensi switching VSMC.



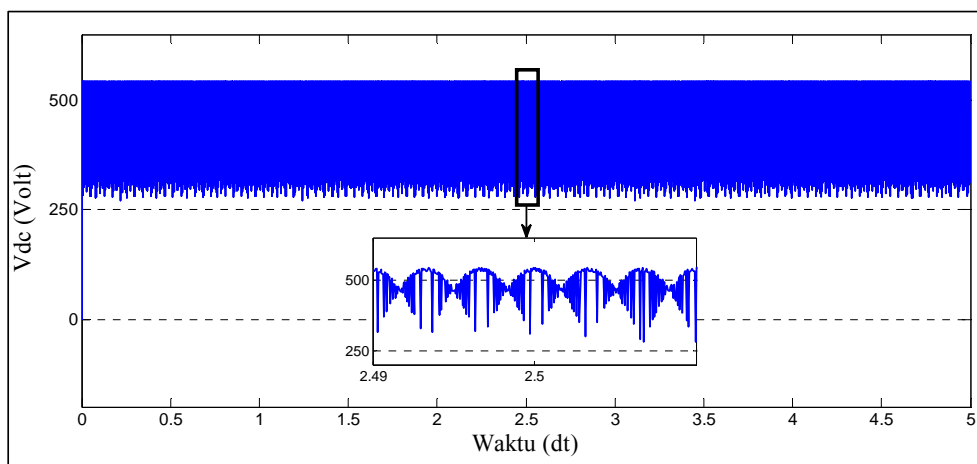
Gambar 5.16 THD arus grid dan arus konverter. (a) THD arus grid
(b) THD arus konverter

Gambar 5.16(a) dan 5.16(b) juga menunjukkan bahwa pada waktu simulasi 4.2 detik, I_{Grid} lebih besar dari I_{Con} . Hal ini disebabkan oleh daya output generator lebih kecil karena kecepatan angin yang rendah, sehingga beban lebih banyak

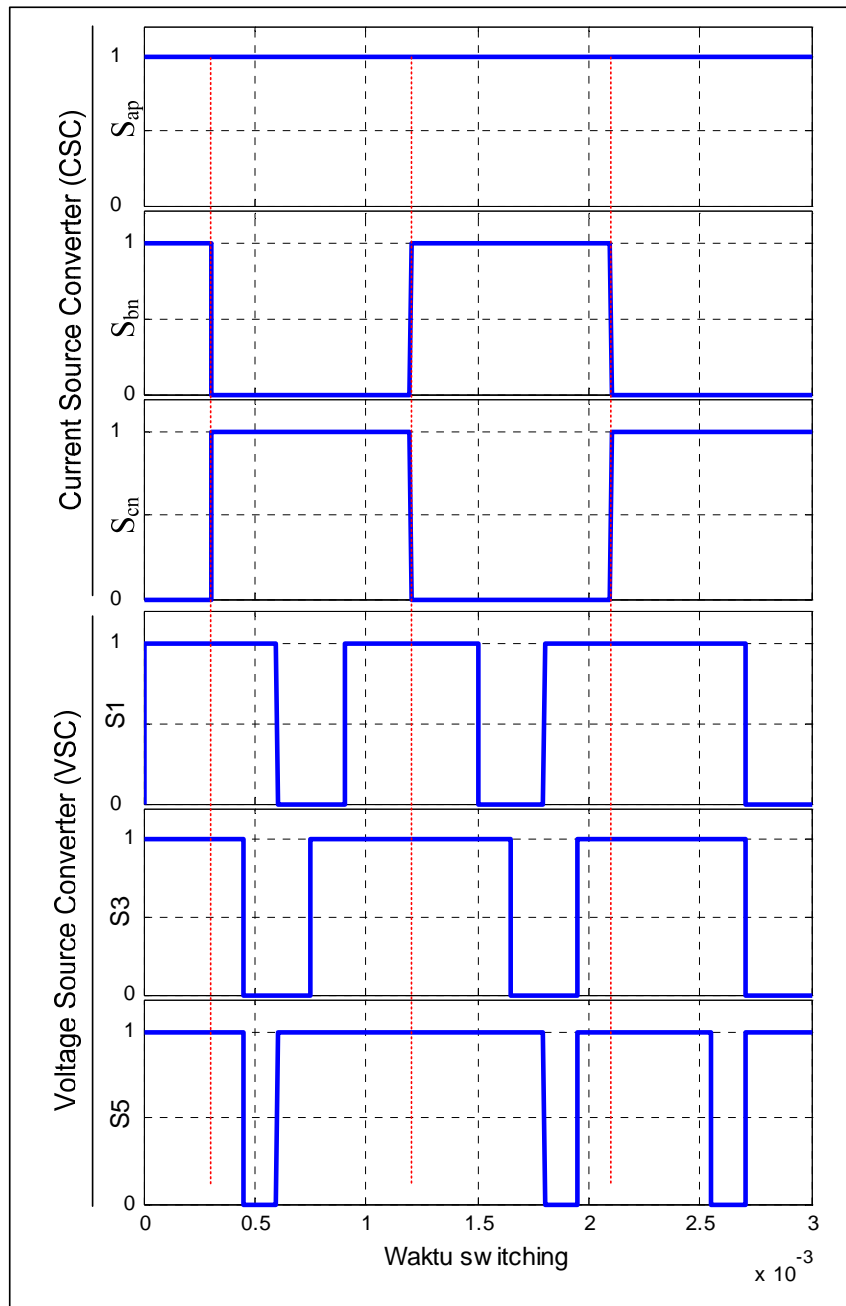
disuplay dari grid. Perubahan arus konverter dan arus grid akibat variasi kecepatan angin dapat dilihat dari grafik rms arus untuk fasa *a* pada Gambar 5.15(d), dimana nilai arus grid berbanding terbalik dengan arus konverter. Ketika kecepatan angin tinggi, arus konverter lebih besar dari arus grid, begitu juga sebaliknya. Gambar 5.15(c) menunjukkan grafik arus beban resistor yang berbentuk sinusoidal murni dengan rms konstan, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.15(d).

Berdasarkan Gambar 5.14, Gambar 5.15 dan Gambar 5.16 dapat disimpulkan bahwa performansi VSMC telah sesuai dengan karakteristik umum matrik konverter, yaitu memiliki kualitas daya yang lebih bagus dibandingkan back to back konverter dengan gelombang arus dan tegangan sinusoidal pada sisi grid. Dengan menggunakan filter LC ukuran kecil, diperoleh THD tegangan grid di bawah THD yang diizinkan IEEE standard 519, yaitu 5%.

Strategi modulasi bagian CSC yang menghilangkan vektor nol, membuat tegangan dc tidak pernah menyentuh nilai nol, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.17. Salah satu tujuan modulasi switch CSC adalah untuk mendapatkan transfer tegangan maksimum. Tujuan ini telah tercapai, seperti yang ditunjukkan oleh grafik tegangan dc pada Gambar 5.17(b) dengan nilai maksimum sebesar 1,5 V_{i_max} , sesuai dengan nilai maksimum tegangan dc dalam Persamaan (3-28). Hal ini menunjukkan bahwa desain teknik modulasi VSMC menggunakan linear carrier SVPWM memberikan hasil yang sesuai dengan perencanaan.



Gambar 5.17 Performansi tegangan dc VSMC.



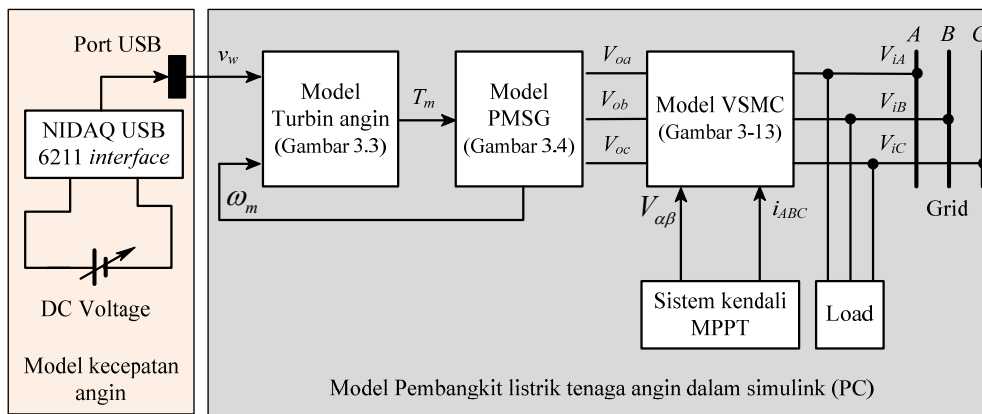
Gambar 5.18. Pulsa modulasi VSMC untuk sektor 1

Satu hal yang menjadi perhatian dalam merancang modulasi switch VSMC adalah koordinasi waktu switching switch CSC dengan switch VSC untuk menghindari terjadinya hubungan singkat. Hal ini dilakukan dengan membuat komutasi switch CSC dengan metode arus dc link nol, yaitu saat switch VSC

dalam kondisi free-wheel atau saat status switching VSC pada vektor nol. Gambar 5.18 menunjukkan status switch CSC dan VSC pada sektor satu. Dalam setiap status switching hanya dua switch CSC yang aktif, yaitu satu switch positif dan satu switch negatif. Switch CSC yang aktif pada sektor satu adalah S_{ap} sebagai switch positif dan S_{bn} , S_{cn} sebagai switch negatif. S_{ap} konduksi selama satu perioda, sedangkan S_{bn} dan S_{cn} konduksi secara bergantian. Pergantian status switching S_{bn} dan S_{cn} terjadi saat switch VSC dalam kondisi free-wheel atau ketiga switchnya dalam kondisi konduksi. Hal ini menunjukkan bahwa koordinasi waktu switching CSC dengan VSC telah sesuai dengan perencanaan, sehingga hubungan singkat antara switch CSC dengan switch VSC dapat dihindari.

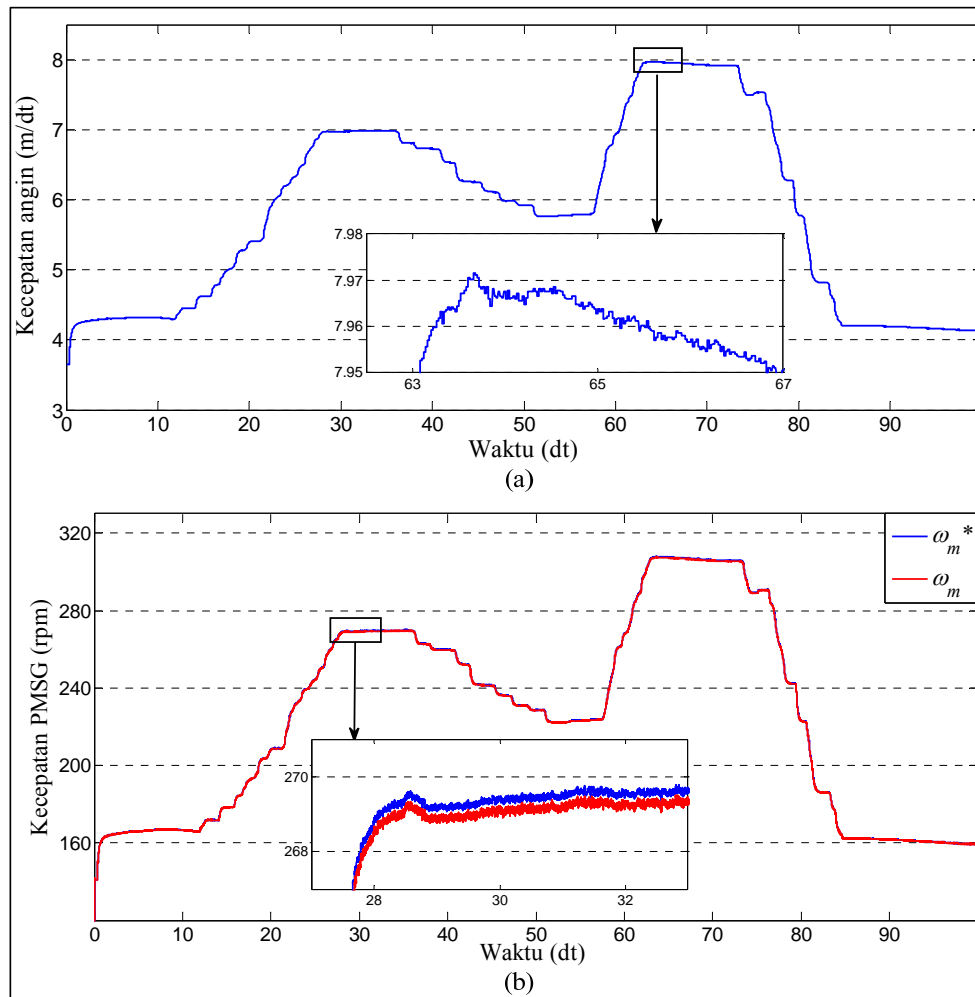
5.6 Hasil Simulasi dengan Nidaq USB 6211

Model pembangkit listrik tenaga angin yang diilustrasikan oleh Gambar 4.1 juga disimulasikan menggunakan *National Instrumen Data Acquisition* (Nidaq) USB 6211. Dalam simulasi ini, sinyal kecepatan angin diperoleh dari tegangan dc eksternal yang diatur secara manual. Nidaq USB 6211 digunakan sebagai interface tegangan dc dengan simulink matlab. Nidaq USB 6211 memiliki rentang input analog -10 Volt sampai 10 Volt dengan kemampuan membaca data 1000 sampel/detik. Gambar 5.19 menunjukkan skema simulasi model menggunakan Nidaq USB 6211.



Gambar 5.19 Skema simulasi model dengan NIDAQ 6211

Dalam simulasi ini, tegangan dc dari sumber eksternal divariasikan sebagai sumber kecepatan angin untuk model dalam simulink matlab. Model pembangkit listrik tenaga angin yang dirancang dalam simulink ditunjukkan oleh Gambar L.4.1 pada Lampiran 4 dan instalasi hardware Nidaq USB 6211 dengan PC ditunjukkan oleh Gambar L.4.2 pada Lampiran 4. Model yang disimulasikan menggunakan kontroller kecepatan AFSMOC dengan algoritma MPPT berbasis LS-SVM. Tegangan dc yang digunakan sebagai sumber kecepatan angin divariasikan dari 4 volt sampai 8 Volt dengan jumlah data 100 sampel/detik, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.20(a).



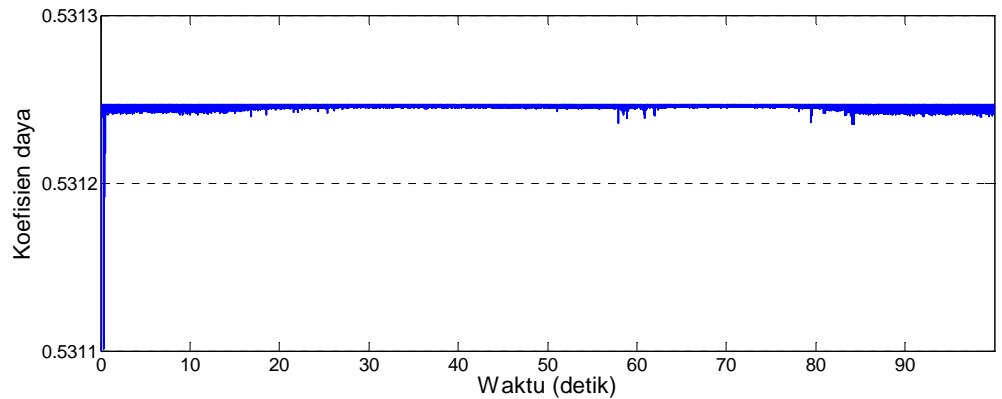
Gambar 5.20 Hasil simulasi dengan Nidaq USB 6211.
(a) kecepatan angin, (b) Kecepatan PMSG

Simulasi dilakukan dalam waktu 100 detik. Respon kecepatan PMSG ω_m dan kecepatan referensi dari algoritma MPPT ω_m^* ditunjukkan oleh Gambar 5.20(b). Hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan PMSG tetap dapat mengikuti kecepatan referensi yang dihasilkan algoritma MPPT. Hal ini mengindikasikan bahwa kontroller kecepatan PMSG menggunakan AFSMOC tetap handal mengendalikan kecepatan PMSG walaupun kecepatan anginnya berasal dari tegangan dc eksternal. Kontroler AFSMOC tetap mampu mengendalikan kecepatan PMSG walaupun kecepatan anginnya memiliki riak yang cukup besar, seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 5.20(a).

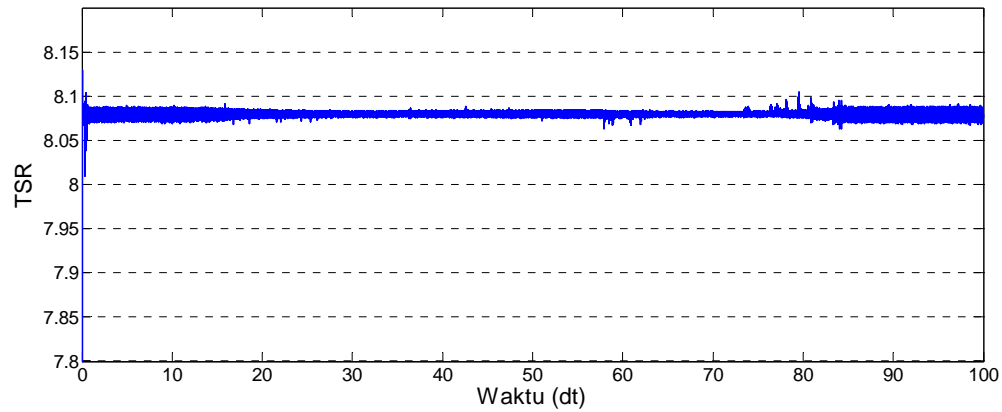
Gambar 5.20(b) juga menunjukkan bahwa kecepatan referensi yang dihasilkan algoritma MPPT memiliki riak yang cukup besar. Hal ini disebabkan oleh riak kecepatan angin dari tegangan dc. Walaupun kecepatan angin bervariasi dengan riak yang cukup besar, tetapi algoritma MPPT tetap mampu menghasilkan kecepatan referensi disekitar titik daya maksimum. Hal ini dapat dilihat dari respon koefisien daya dan TSR turbin angin, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.21(a) dan 5.21(b). Gambar 5.21(a) menunjukkan respon koefisien daya turbin angin tetap berada di sekitar titik maksimum, yaitu 0.53125. Besarnya riak kecepatan angin juga telah menimbulkan riak yang besar pada koefisien daya.

Gambar 5.21(b) menunjukkan respon TSR turbin angin yang tetap berada di sekitar nilai optimum 8.09 walaupun kecepatan angin berubah-ubah dari sumber eksternal. Hal ini menunjukkan bahwa desain sistem kendali MPPT dengan menggunakan multiclass LS-SVM sebagai algoritma MPPT dan kontroler AFSMOC sebagai pengendali kecepatan PMSG telah sukses mengendalikan daya output generator disekitar titik daya maksimum. Hal ini dapat dilihat dari grafik daya yang ditunjukkan oleh Gambar 5.21(c). Saat kecepatan angin sekitar 7.97 m/dt pada waktu simulasi 64 detik, diperoleh daya mekanik P_m sekitar 2070 watt, daya generator P_{Gen} sekitar 1875 watt dan daya konverter P_{Con} 1790 watt. Berdasarkan Persamaan (3-1), daya angin yang ditangkap turbin saat kecepatan angin 7.97 m/dt adalah 3898 watt. Dari data daya angin dan daya mekanik turbin ini diperoleh koefisien daya 0.53, dimana nilai ini sama dengan nilai koefisien daya maksimum turbin angin. Hal ini menunjukkan bahwa pembangkit listrik tenaga angin beroperasi disekitar titik daya maksimum. Gambar 5.21(c) juga

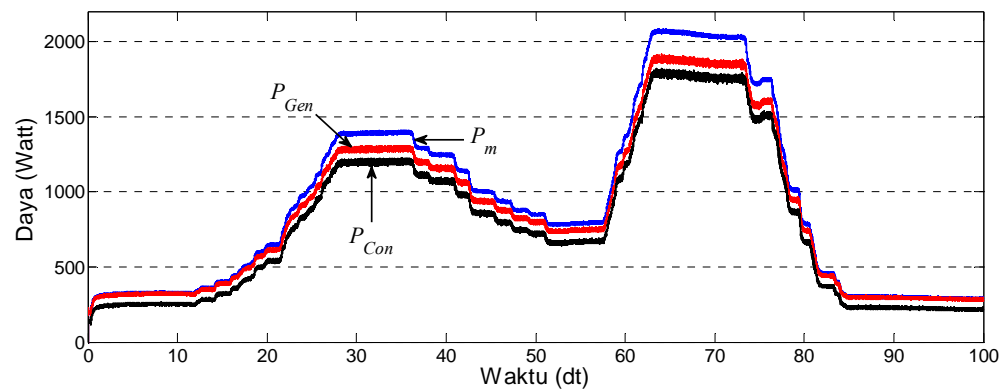
menunjukkan bahwa daya mekanik, daya output generator dan daya konverter memiliki riak yang cukup besar. Hal ini disebabkan oleh riak tegangan dc sebagai sumber kecepatan angin, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.20(a).



(a)



(b)



(c)

Gambar 5.21 Performansi sistem kendali MPPT dengan Nidaq USB 6211
(a) Koefisien daya, (b) TSR, (c) daya

Semua hasil simulasi menunjukkan bahwa tujuan penelitian untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas daya pembangkit listrik tenaga angin telah diperoleh sesuai dengan perencanaan. Sesuai dengan tujuan penelitian, Peningkatan efisiensi dilakukan dengan mendesain sistem kendali MPPT, sedangkan peningkatan kualitas daya dilakukan dengan menggunakan VSMC sebagai konverter daya pembangkit. Desain sistem kendali MPPT dengan menggunakan multiclass LS-SVM sebagai algoritma MPPT dan kontroler AFSMOC sebagai pengendali kecepatan PMSG telah sukses mengendalikan daya output generator di sekitar titik daya maksimum pada setiap variasi kecepatan angin, sehingga efisiensi pembangkit listrik tenaga angin dapat ditingkatkan.

Penggunaan VSMC sebagai konverter daya juga telah menghasilkan gelombang sinusoidal pada arus dan tegangan grid dengan THD yang rendah, sehingga tujuan peningkatan kualitas daya pembangkit juga telah dicapai dengan menggunakan konverter ini.

BAB 6

KESIMPULAN

6.1 Kesimpulan

Penelitian ini membahas peningkatan performansi pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan PMSG dengan cara meningkatkan efisiensi dan kualitas daya pembangkit. Peningkatan efisiensi dilakukan dengan mendesain sistem kendali MPPT, sedangkan peningkatan kualitas daya pembangkit dilakukan dengan memilih jenis konverter daya yang rendah harmonisa. Berdasarkan hasil studi literatur, dipilih konverter daya tipe VSMC dengan keunggulan antara lain tidak menggunakan dc link, dapat menghasilkan gelombang tegangan dan arus sinusoidal pada sisi grid serta jumlah switch aktifnya lebih sedikit dibandingkan matrix konverter lain.

Sistem kendali MPPT didesain dengan mengembangkan algoritma MPPT dan controller kecepatan PMSG. Algoritma MPPT dirancang berdasarkan prinsip algoritma PO menggunakan algoritma multiclass LS-SVM. Algoritma multiclass LS-SVM digunakan untuk mendapatkan ukuran step yang bervariasi, sehingga dapat mempercepat respon mencapai titik daya maksimum serta mampu meminimalisir riak kecepatan pada titik daya maksimum. Multiclass LS-SVM dirancang dengan output 35 kelas ukuran step dan ditraining dengan teknik encode *one vs one* dan encode *distance hamming*. Controller kecepatan dikembangkan berdasarkan prinsip sensorless FOC menggunakan metode AFSMOC. Dalam metode ini digunakan T2FS untuk mendapatkan penguat adaptif pada sliding surface SMC, sehingga dapat meningkatkan ketahanan controller terhadap gangguan eksternal.

Performansi rancangan model pembangkit listrik tenaga angin dilihat melalui simulasi. Berdasarkan hasil simulasi dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Algoritma MPPT dipilih menggunakan multiclass LS-SVM dengan metode RBF kernel karena memiliki overall accuracy tertinggi dari metode lain. LS-SVM dengan linear kernel memiliki overall accuracy 59.67%, Polynomial kernel 84.3% dan RBF kernel 97.19%.

2. Penggunaan algoritma LS-SVM dengan step yang bervariasi memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan algoritma PO. Kecepatan referensi dapat dipercepat mencapai titik maksimum dari 0.41 detik pada algoritma PO menjadi 0.1 detik pada kondisi transien. Algoritma LS-SVM mampu mereduksi error maksimum koefisien daya dari 0.00775 (1.46%) pada algoritma PO menjadi 0.00025 (0.047%) dan mereduksi error maksimum TSR dari -0.56 (6.92%) pada PO menjadi -0.09 (1.1%).
3. Variasi ukuran step pada algoritma LS-SVM mampu mereduksi riak kecepatan referensi di sekitar titik daya maksimum dari ± 0.3 rpm pada algoritma PO menjadi ± 0.05 rpm.
4. Desain kontroller kecepatan dengan metode AFSMOC juga telah memberikan respon kecepatan yang lebih baik dibandingkan metode SMC standar. Kontroller AFSMOC dapat mereduksi error maksimum kecepatan PMSG dari 3.5 rpm (1.27%) pada kontroller SMC menjadi 0.4 rpm (0.14%) pada kondisi transien. Kontroler AFSMOC juga telah mampu meminimalisir error kecepatan pada kondisi tunak, sehingga PMSG dapat beroperasi di sekitar titik daya output maksimum.
5. Penggunaan VMSC dapat meningkatkan kualitas daya pembangkit listrik tenaga angin, karena dapat menghasilkan gelombang tegangan dan arus sinusoidal pada sisi grid. Dengan menggunakan filter LC, diperoleh THD tegangan grid hanya sebesar 0.01% dan THD arus grid sebesar 5.79%.

Semua hasil simulasi menunjukkan bahwa model pembangkit listrik tenaga angin yang diusulkan menggunakan VSMC dengan sistem kendali MPPT berbasis AFSMOC dan LS-SVM telah memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan model pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan sistem kendali MPPT berbasis algoritma PO.

6.2 Penelitian Selanjutnya

Penelitian ini dilakukan baru sebatas simulasi. Untuk selanjutnya dapat dilakukan implementasi hardware untuk membuktikan keunggulan metode yang diusulkan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M.A., Yatim, AHM., Tan, CW dan Saidur, R. (2012), “A Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy Systems”, *Renewable Energy*, Vol. 16, No. 5, hal. 3220–3227.
- Ahmed, T., Nishida, K. dan Nakaoka, M. (2010), “Wind Power Grid Integration of an IPMSG Using a Diode Rectifier and a Simple MPPT Control for Grid-Side Inverters”, *Journal of Power Electronics*, vol. 10, No. 5, hal. 548–554.
- Aner, M. dan Nowicki, E. dan Wood, D. (2011), “Two-level Backward Operation of a VSMC for PMSG Grid-connected Variable Speed Wind Turbine Systems”, *2011 IEEE Int. Electric Machine & Drive Conference (IEMDC)*, hal. 1100–1106.
- Bhavna, J., Shailendra Jain. dan Nema, RK. (2015), “Control Strategies of Grid Interfaced Wind Energy Conversion System: an Overview”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 47, hal. 983–996.
- Baroudi, JA., Dinavahi, V. dan Knight, AM. (2007), “A Review of Power Converter Topologies for Wind Generators”, *Renewable Energy*, Vol. 32, hal. 2369–2385.
- Bose, B.K. (2002), *Modern Power Electronic and AC drives*, Prentice-Hall. Inc, Upper Saddle River.
- Brabanter, KD., Karsmaker, P., Vandewalle, J. dan Suykens, J.A.K. (2011) *LS-SVMLab Toolbox User Guide Version 1.8*, ESAT-SISTA, Belgium.
- Brahmi, J., Krichen, L. dan Ouali, A. (2009), “A Comparative Study Between Three Sensorless Control Strategies for PMSG in WECS”, *Applied Energy*. Vol. 86, hal. 1565–1573.
- Chen, CH., Hong, CM. dan Fu-Sheng Cheng, FS.(2012), “Intelligent Speed Sensorless Maximum Power Point Tracking Control for Wind Generation System”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 42, No. 1, hal. 399–407.
- Chinchilla, M., Arnaltes, S. dan Burgos, J.C. (2006), “Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, hal. 130 – 135.
- El-Sousy, FFM. (2011), “Robust Wavelet Neural Network Sliding Mode Control System for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive”, *IET Electric Power Applications*, Vol. 5, No. 1, hal. 113–132.

- Eltamaly, AM. dan Farh, HM. (2013), “Maximum Power Extraction from Wind Energy System Based on Fuzzy Logic Control”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 97, hal. 144–150.
- Freire, N., Estima, J. dan Cardoso, A. (2012), “A Comparative Analysis of PMSG Drives Based on Vector Control and Direct Control Techniques for Wind Turbine Applications”, *Electrical Review Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 88, No. 1, hal. 184 – 187.
- Gestel, T.V., Suykens, JAK. dan Lanckriet, G . (2002), “Multiclass LS-SVMs: Moderated Outputs and Coding-Decoding Schemes”, *Neural Processing Letters*, Vol. 15, hal. 45-58.
- Gestel, TV., Suykens, JAK. dan Baesens, B. (2004), “Benchmarking LS-SVM Classifiers”, *Machine Learning*, Vol. 54, hal. 5–32.
- Goudarzi, N. dan Zhu, W D. (2013), “A Review on the Development of Wind Turbine Generators Across the World”, *International Journal of Dynamics and Control*, Vol. 1, No. 2, hal. 192-202.
- Haque, M.E., Negnevitsky, M. dan Muttaqi, KM. (2010), “A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine With a PMSG”, *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 46, No. 1, hal. 331-339.
- Heier, Siegfried. (1998), *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons Ltd, New York.
- Hong, CM., Cheng, FS. Dan Chen, CH. (2014), “Optimal Control for Variable-Speed Wind Generation Systems Using General Regression Neural Network”, *Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 60, hal. 14–23.
- Jain, AK. dan Ranganathan, V.T. (2010), “Modeling and Field Oriented Control of Salient Pole Wound Field Synchronous Machine in Stator Flux Coordinates”, *IEEE Transaction on Industrial Electronic*, Vol. 58, No. 3, hal. 960 - 970.
- Karnik, N. N., Mendel, J. M. dan Liang, Q. (1999), “Type-2 Fuzzy Logic Systems”, *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 6, hal. 643 – 658.
- Kim, KH., Jeung, YC., Lee, DC. dan Kim, H.G. (2010) “Robust Control of PMSG Wind Turbine Systems with Back-to-Back PWM Converters”, *Proceeding of 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, hal. 433 – 437.
- Kolar, JW., Friedli, T., Rodriguez, J. dan Wheeler, PW. (2011), “Review of Three-Phase PWM AC–AC Converter Topologies”, *IEEE Transaction on Industrial Electronic*, Vol. 58, No. 11, hal. 4988-5006.

- Kolar, JW., Schafmeister, F., Round, SD. Dan Ertl, H. (2007), “Novel Three-Phase AC–AC Sparse Matrix Converters”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 22, No. 5, hal. 1649 – 1661.
- Lara, OA., Jenkins, N., Ekanayake, J., Cartwright, P. dan Hughes, M. (2009), *Wind Energy Generation*, John Willey & Sons Ltd., West Sussex.
- Lee, C.Y., Chen, PH. dan Shen, YX. (2011), “MPPT System of Small Wind Power Generator Using RBFNN Approach”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, hal.12058–12065.
- Li, XP., Fu, WL., Shi, QJ., Xu, JB. dan Quan-Yuan Jiang, QY. (2013), “A Fuzzy Logical MPPT Control Strategy for PMSG Wind Generation Systems”, *Journal of Electronic Science and Technology*, Vol. 11, No. 1, hal. 72-77.
- Liang, Q. dan Mendel, J. M. (2000), “Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Theory and Design”, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 8, No. 5, hal. 535 – 550.
- Lin, WM. dan Hong, CM. (2010), “Intelligent Approach to MPPT Control Strategy for Variable Speed WTGs”, *Energy*, Vol. 35, hal. 2440-2447.
- Mahersi, E., Khedher, A. dan Mimouni, M. F. (2013), “The Wind energy Conversion System Using PMSG Controlled by Vector Control and SMC Strategies”, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 3, hal. 42-50.
- Manwell, J.F., McGowan, JG. dan Rogers, A.L. (2005), *Wind Energy Explained : Theory, Design and Application*, John Willey & Sons Ltd., West Sussex.
- Menharrar, A., Tioursi, M., Hatti, M. dan Stambouli, AB. (2011), “A Variable Speed Wind Generator Maximum Power Tracking Based on Adaptative Neuro Fuzzy Inference System”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, hal. 7659–7664.
- Melício, R., Mendes, VMF. Dan Catalao, J.P.S. (2011), “Comparative Study of Power Converter Topologies and Control Strategies for the Harmonic Performance of Variable Speed WTGs”, *Energy*, Vol. 36, hal. 520-529.
- Mendel, JM., John, RI. dan Liu, Feilong. (2006), “Interval Type-2 FLS Made Simple”, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 14, No. 6, hal. 808 - 821.
- Merzoug, MS. dan Naceri, F. (2008), “Comparison of Field-Oriented Control and Direct Torque Control for PMSM”, *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 35, hal. 300-305.
- Nasiri, M., Milimonfared, J. dan Fathi, S.H. (2014), “Modeling, Analysis and Comparison of TSR and OTC Methods for MPPT and Power Smoothing in PMSG Based Wind Turbines”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, hal. 892–900.

- Popa, Lucian Mihet dan Groza, Voicu. (2011), “Modeling and Simulation of a 12 MW Active-Stall Constant-Speed Wind Farm”, dalam *Wind Farm - Impact in Power System and Alternatives to Improve the Integration*, eds. Suvire, GO., Intech, Netherlands, hal. 271 - 294.
- Pouresmaeil, E., Bellmunt, O.G., Miracle, DM. dan Jane, J.B. (2011), “Multilevel Converter Control for Renewable Energy Integration to the Power Grid”, *Energy*, Vol. 36, hal. 950-963.
- PUSDATIN Kementrian ESDM (2014), *Sektor Pasokan Energi Pembangkit dari Energi Baru dan Terbarukan : Indonesia 2050 Pathway Calculator*. Kementrian ESDM, Jakarta.
- Rigatos, G., Siano, P. dan Zervos, N. (2014), “Sensorless Control of Distributed Power Generators with the Derivative Free Nonlinear Kalman Filter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61 , No. 11, hal. 6369 – 6382.
- Round, S., Schafmeister, F., Heldwein, M., Pereira, E., Serpa, L. dan Kolar, JW. (2006), “Comparison of Performance and Realization Effort of a VSMC to a Voltage DC Link PWM Inverter with Active Front end”, *IEE Japanese Transaction*, Vol. 126-D, No. 5, hal. 578–588.
- Schafmeister, F. (2008), *Indirekte Sparse Matrix Konverter*, Disertasi Ph.D., Eidgenossischen Technischen Hochschule, Zurich.
- Schubel, P. J. dan Crossley, R. J. (2012), “Wind Turbine Blade Design”, *Energies*, Vol. 5, hal. 3425-3449.
- Senjyu, T., Muhando, EB. dan Yona A. (2007), “Maximum Wind Power Capture by Sensorless Rotor Position and Wind Velocity Estimation from Flux Linkage and Sliding Observer”, *Int. Journal Emerging Electric Power Systems*, Vol. 8.
- Shuhui, Li., Haskew, TA., Swatloski, RP. Dan Gathings, W. (2012), “Optimal and Direct Current Vector Control of Direct Driven PMSG Wind Turbines”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 27, No. 5, hal. 2325 – 2337.
- Singh, M. dan Chandra, A. (2011), “Application of Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System for Sensorless Control of PMSG-Based Wind Turbine With Nonlinear Load Compensation Capabilities”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 26, No. 1, hal. 165-175.
- Suykens, JAK. dan Vandewalle, J. (1999a), “Least Squares Support Vector Machine Classifiers”, *Neural Processing Letters*, vol. 9, no. 3, hal. 293–300.
- Suykens, JAK. dan Vandewalle, J. (1999b), “Multiclass Least Squares Support Vector Machine”, *Proceeding of International Joint Conference on Neural Networks*, Vol. 2, hal. 900 - 903.

- Suykens, JAK, (2001), "Nonlinear modeling and Support Vector Machines", *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Vol. 1, hal. 287 – 294.
- Suykens, JAK., Horvath, G., Basu, S., Micchelli, C. dan Vandewalle, J. (2003), "Support Vector Machines : Least Squares Approaches and Extensions", dalam *Advances in Learning Theory : Methods, Models and Applications*, eds. Suykens, JAK., Horvath, G., Basu, S., Micchelli, C. dan Vandewalle, J, IOS Press, Netherlands, hal. 155 - 178.
- Tong, L., Zou, X., Feng, S dan Chen, Y. (2013), "An SRF-PLL Based Sensorless Vector Control Using the Predictive Deadbeat Algorithm for the Direct-Driven PMSG", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 29, No. 6, hal. 2837 – 2849.
- Vapnik, V. N. (1999), "An Overview of Statistical Learning Theory", *IEEE Transaction on Neural Networks*, Vol. 10, No. 5, hal. 988–999.
- Vas, Peter. (1998), *Sensorless Vector and DTC*, Oxford University Press, Oxford.
- Wang, Bingsen dan Venkataramanan, Giri. (2006), "A Carrier Based PWM Algorithm for Indirect Matrix Converters", *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jeju – Korea.
- Wang, Y., Chen, R., Tan, J. dan Mei Su. (2009) "An Optimal PID Control of Wind Generation based on Matrix Converter", *Proceeding of 6th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference*, hal. 1104 – 1109.
- Wargadalam, VJ. (2014), "Potensi energy angin dan Kelayakan Harga Listrik yang Dihasilkan", *Buletin Mineral dan Energi*, Vol. 12, No. 1, hal. 1-10.
- Wei, Lixiang dan Lipo, TA. (2001) "A Novel Matrix Converter Topology With Simple Commutation", *Proceeding of 36th IAS Annual Meeting: The Industrial Appliaction Conference*, hal. 1749 - 1754.
- Xia, C., Wang, X., Li, S. dan Chen, X. (2011), "Improved integral sliding mode control methods for speed control of PMSM system", *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 7, No. 4, hal. 1971-1982.
- Yang, AG. dan Li, BH. (2010), "Application of a Matrix Converter for PMSG Wind Turbine Generation System", *Proceeding of 2nd IEEE International Symposium on Power Electronic for Distributed Generation Systems*, hal. 185 – 189.
- Yao, S., Gui, SM. Dan Hua, Wei. (2008), "One Novel Variable-Speed Wind Energy System Based on PMSG and Super Sparse Matrix Converter", *Proceeding of Int. Conference on Electrical Machines and Systems*, hal. 2384 – 2389.

- Yongdong, L dan Hao, Z. (2008), “Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Generator - A survey”, *Proceeding of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, hal. 1232-1239.
- Yu, X. dan Kaynak, O. (2009), “Sliding-Mode Control With Soft Computing : A Survey”, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 9, hal. 375 - 385.
- Yuhendri, Muldi., Ashari, M. dan Purnomo, MH. (2010), “Sensorless Maximum Power Point Tracking For Stand Alone Wind Generation System Based on Adaptive Neuro Fuzzy Inference System”, *5th Int. Student Conf. on Advance Science and Technology (ICAST) 2010*, Kumamoto University – Jepang.
- Yuhendri, Muldi., Ashari, M. dan Purnomo, MH. (2011a), “Maximum Output Power Tracking of Wind Turbine Using Intelligent Control”, *TELKOMNIKA*, Vol. 9, No. 2, hal. 217-226.
- Yuhendri, Muldi., Ashari, M. dan Purnomo, MH. (2011b), “Linear Quadratic Regulator Design For Modular Matrix Converter Using Genetic Algorithm”, *2011 Int. Conference on Industrial and Intelligent Information (ICIII 2011)*, Bali – Indonesia.
- Yuhendri, Muldi., Ashari, M. dan Purnomo, MH. (2015a), “Strategi Modulasi Very Sparse Matrix Converter Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Metode Linear Carrier SVPWM”, *Seminar Nasional Otomasi Industri dan Teknologi Informasi (SNOITI) 2015*, Surabaya – Indonesia.
- Yuhendri, Muldi., Ashari, M. dan Purnomo, MH. (2015b), “Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control for Grid-Connected Wind Turbine Generator Using Very Sparse Matrix Converter”, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 5, No. 3, hal. 668-676.
- Yuhendri, Muldi., Ashari, M. dan Purnomo, MH. (2015c), “A Novel Sensorless MPPT For Wind Turbine Generators Using Very Sparse Matrix Converter Based on Hybrid Intelligent Control”, *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 10, No. 2, hal. 233-243.
- Zhang, H., Shi, W. dan Liu, K. (2012), “Fuzzy Topology Integrated Support Vector Machine for Remotely Sensed Image Classification” , *IEEE Transactin on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 50, No. 3, hal. 850-862.
- Zhao, Y., Wei, C., Zhang, Z. dan Qiao, W. (2013), “A Review on Position/Speed Sensorless Control for Permanent Magnet Synchronous Machine Based Wind Energy Conversion Systems”, *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.1, No. 4, hal. 203 – 216.

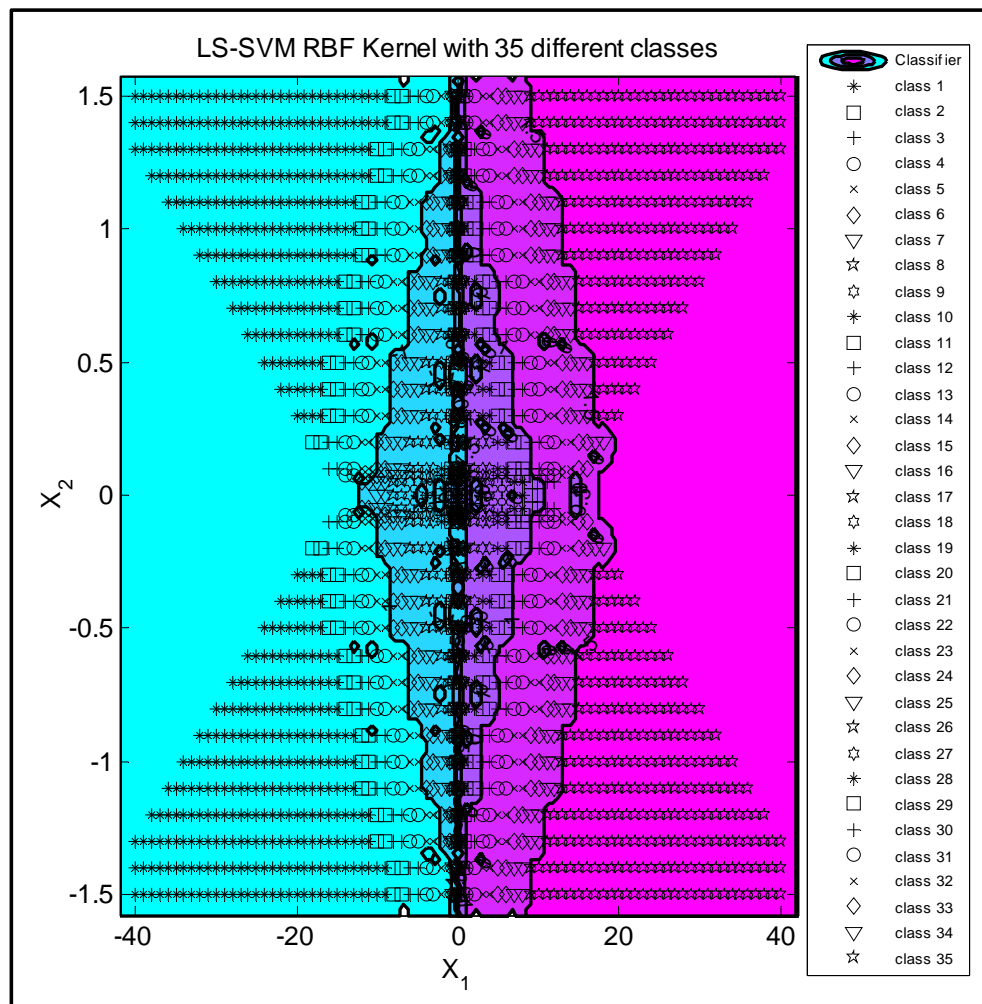
Lampiran 1. Hasil Training Multiclass LS-SVM

1.1 Training dengan RBF Kernel

```

x_dim      : 2
y_dim      : 595
nb_data    : 2745
kernel_type : 'RBF_kernel'
xtrain     : [2745x2]
ytrain     : [2745x595]
gam        : [1x595 double]
codetype   : 'code_OneVsOne'
codedist_fct : 'codedist_hamming'
alpha      : [2745x595 double]
b          : [1x595 double]

```



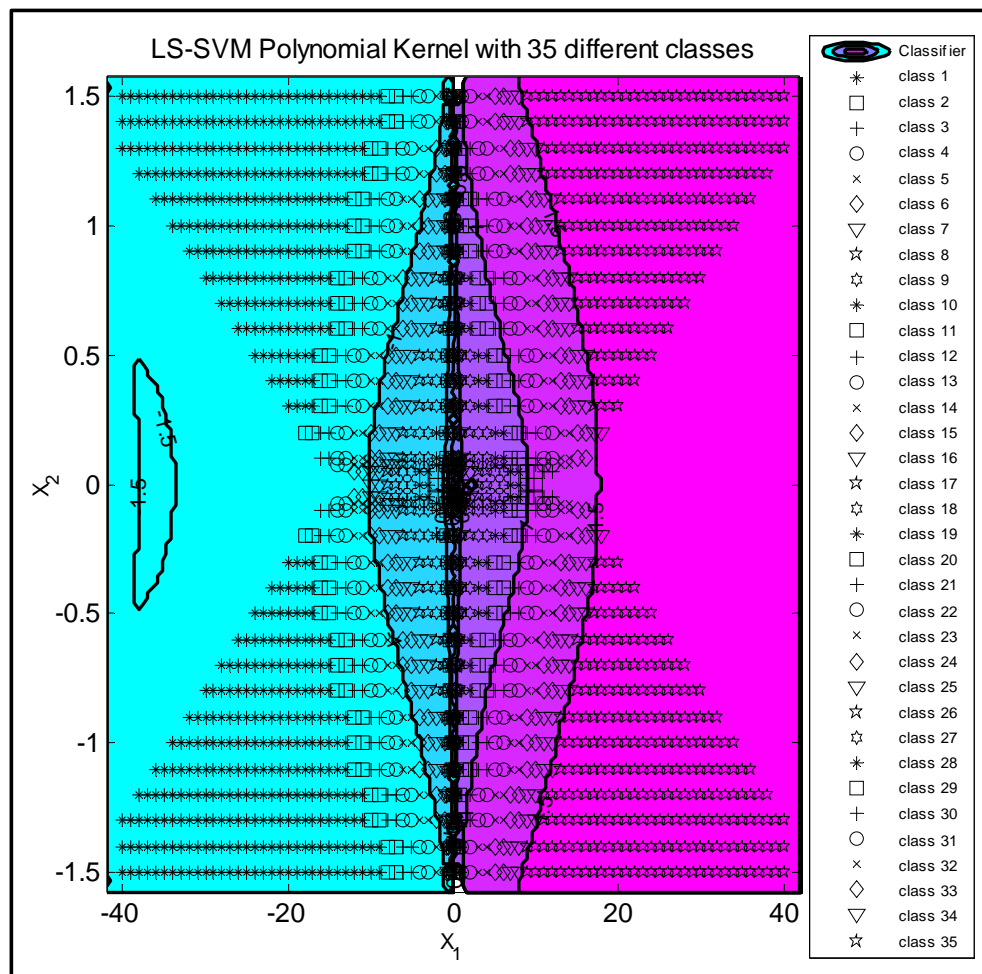
Gambar L1.1 Hasil training multiclass LS-SVM dengan metode RBF kernel

1.2 Training dengan Polynomial Kernel

```

x_dim      : 2
y_dim      : 595
nb_data    : 2745
kernel_type : 'poly_kernel'
xtrain     : [2745x2]
ytrain     : [2745x595]
gam        : [1x595 double]
codetype   : 'code_OneVsOne'
codedist_fct : 'codedist_hamming'
alpha      : [2745x595 double]
b          : [1x595 double]

```



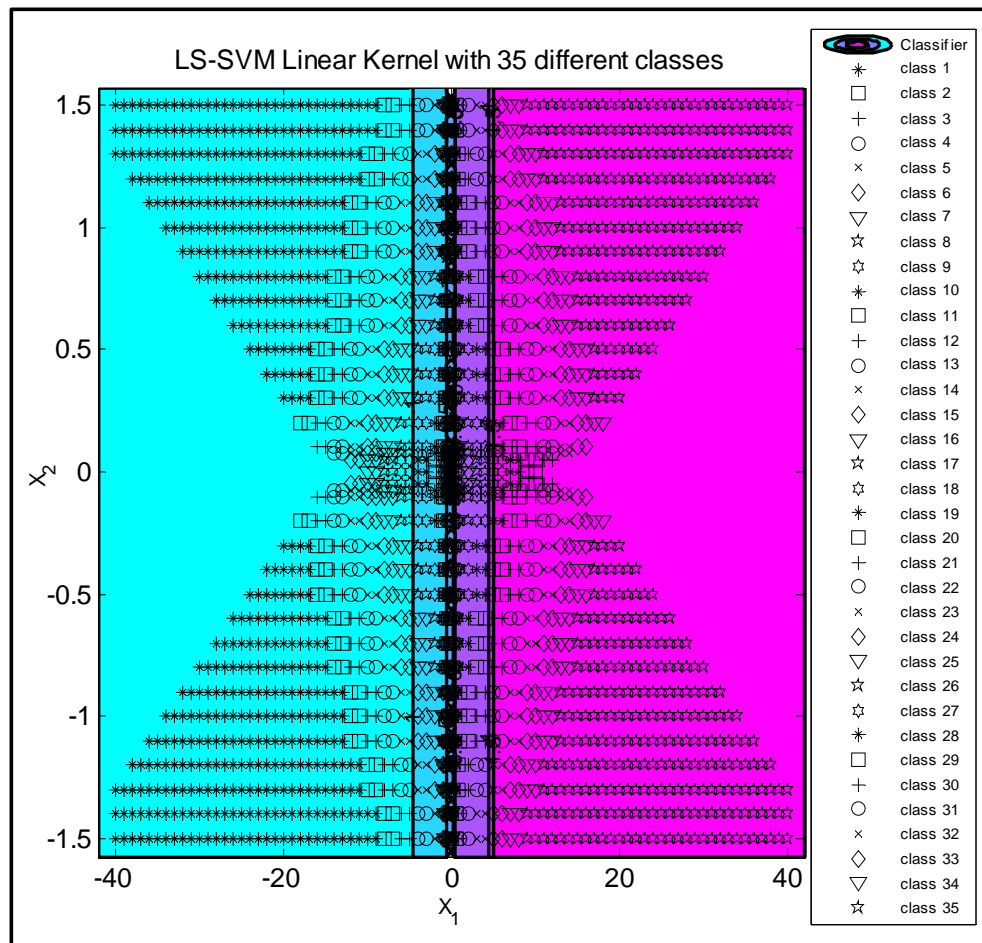
Gambar L.1.2. Hasil training multiclass LS-SVM dengan metode Polynomial kernel

1.3 Training dengan Linear Kernel

```

x_dim      : 2
y_dim      : 595
nb_data    : 2745
kernel_type : 'lin_kernel'
xtrain     : [2745x2]
ytrain     : [2745x595]
gam        : [1x595 double]
codetype    : 'code_OneVsOne'
codedist_fct : 'codedist_hamming'
alpha      : [2745x595 double]
b          : [1x595 double]

```



Gambar L.1.3. Hasil training multiclass LS-SVM dengan metode Linear kernel

Lampiran 2. Matrik Konfusi Hasil Training LS-SVM

2.1 RBF Kernel

		Kelas Training																																	Total	User Accuracy %	Diag				
		-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.075	-0.05	0	0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3				1.4	1.5	MC	
Kelas Referensi	-1.5	496	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	496	100.0	496	
	-1.4	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56	100.0	56	
	-1.3	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	100.0	60	
	-1.2	0	0	0	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	100.0	64	
	-1.1	0	0	0	0	61	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	95.3	61	
	-1	0	0	0	0	0	60	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	88.2	60	
	-0.9	0	0	0	0	0	0	11	55	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	78.6	55	
	-0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	68	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	97.1	68
	-0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	97.1	68
	-0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	97.1	68
	-0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	100.0	70
	-0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	58	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	93.5	58
	-0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	96.3	52
	-0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	97.6	41
	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	93.3	28
	-0.075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	100.0	18
	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	83.3	5	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	80.0	4	
	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	100.0	6	
	0.075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	94.4	17	
0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	100.0	30		
0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	92.9	39	
0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	44	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	81.5	44	
0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	58	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	93.5	58	
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	100.0	70	
0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	97.1	68	
0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	94.3	66		
0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	94.3	66		
0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	66	0	0	0	0	0	0	0	0	70	94.3	66			
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	66	0	0	0	0	0	0	68	97.1	66			
1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	0	0	0	0	64	100.0	64			
1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	0	0	0	64	100.0	64			
1.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	60	100.0	60			
1.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56	0	0	56	100.0	56			
1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	496	0	496	100.0	496			
TOTAL		496	56	60	64	61	74	63	72	70	70	74	60	54	43	29	19	5	4	8	17	30	47	49	60	74	72	70	70	68	66	64	64	60	56	496	0	2745			
Producer Accuracy %		100	100	100	100	100	81.1	87.3	94.4	97.1	97.1	94.6	96.7	96.3	95.3	96.6	94.7	100	100	75	100	100	83.0	89.8	96.7	94.6	94.4	94.3	94.3	97.1	100	100	100	100	100	100	0				
Overall Accuracy %					97.19																																				
Diagonal		496	56	60	64	61	60	55	68	68	68	70	58	52	41	28	18	5	4	6	17	30	39	44	58	70	68	66	66	66	66	64	64	60	56	496		2668			

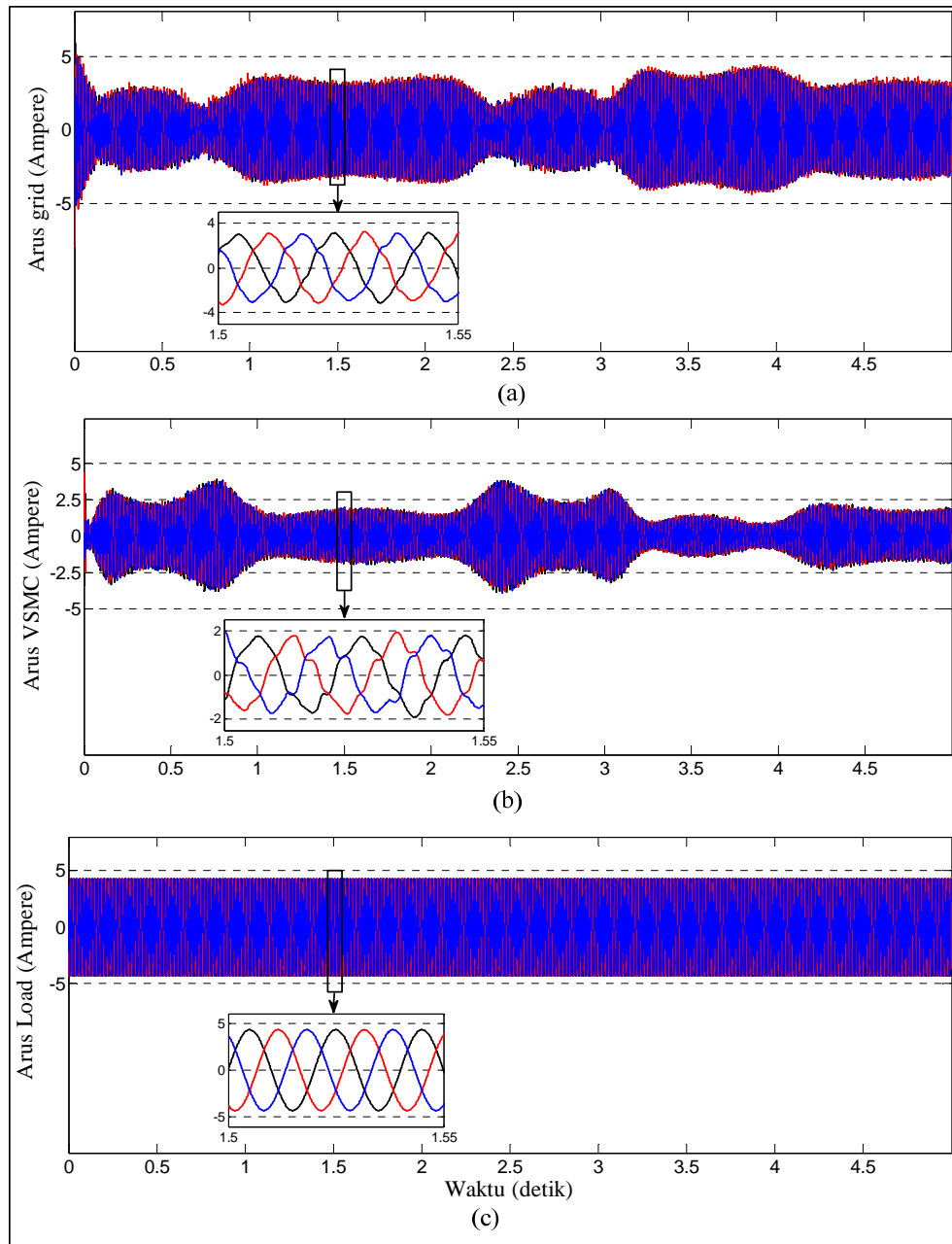
2.2 Polynomial Kernel

		Kelas Training																																				Total	User Accuracy %	Diag
		-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.075	-0.05	0	0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	MC			
K e l a s R e f e r e n s i	-1.5	490	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	496	98.8	490	
	-1.4	8	40	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56	71.4	40	
	-1.3	0	8	44	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	73.3	44		
	-1.2	0	0	6	50	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	78.1	50		
	-1.1	0	0	0	6	48	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	75.0	48		
	-1	0	0	0	0	8	48	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	70.6	48		
	-0.9	0	0	0	0	0	9	49	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	70	70.0	49		
	-0.8	0	0	0	0	0	0	6	56	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	80.0	56		
	-0.7	0	0	0	0	0	0	0	8	54	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	77.1	54	
	-0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	8	52	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	74.3	52	
	-0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	53	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	75.7	53	
	-0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	50	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	80.6	50	
	-0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	42	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	77.8	42	
	-0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	35	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	83.3	35	
	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	23	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	76.7	23	
	-0.075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	83.3	15	
	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	100.0	6	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	0.0	0	
	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	100.0	6	
	0.075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	83.3	15	
	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	23	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	76.7	23	
	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	35	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	83.3	35	
	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	43	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	79.6	43	
	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	47	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	75.8	47	
	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	54	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	77.1	54	
	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	52	7	0	0	0	0	0	0	0	0	70	74.3	52	
	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	53	7	0	0	0	0	0	0	0	0	70	75.7	53	
	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	49	9	0	0	0	0	0	0	70	70.0	49		
	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	50	8	0	0	0	0	2	70	71.4	50
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	50	6	0	0	0	0	68	73.5	50	
	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	48	6	0	0	0	64	75.0	48	
	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	54	2	0	0	64	84.4	54	
	1.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	44	6	0	60	73.3	44	
	1.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	42	6	0	56	75.0	42
	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	494	0	496	99.6	494	
TOTAL		498	54	58	64	64	67	67	74	70	69	69	64	51	44	30	19	6	0	6	21	30	44	54	60	72	70	72	66	71	68	62	70	54	50	500	7	2745		
Producer Accuracy %		98.4	74.1	75.9	78.1	75.0	71.6	73.1	75.7	77.1	75.4	76.8	78.1	82.4	79.5	76.7	78.9	100	0	100	71	76.7	79.5	79.6	78.3	75.0	74.3	73.6	74.2	70.4	73.5	77.4	77.1	81.5	84	99	0.3			
Overall Accuracy %		84.30																																						
Diagonal		490	40	44	50	48	48	49	56	54	52	53	50	42	35	23	15	6	0	6	15	23	35	43	47	54	52	53	49	50	50	48	54	44	42	494		2314		

2.3 Linear Kernel

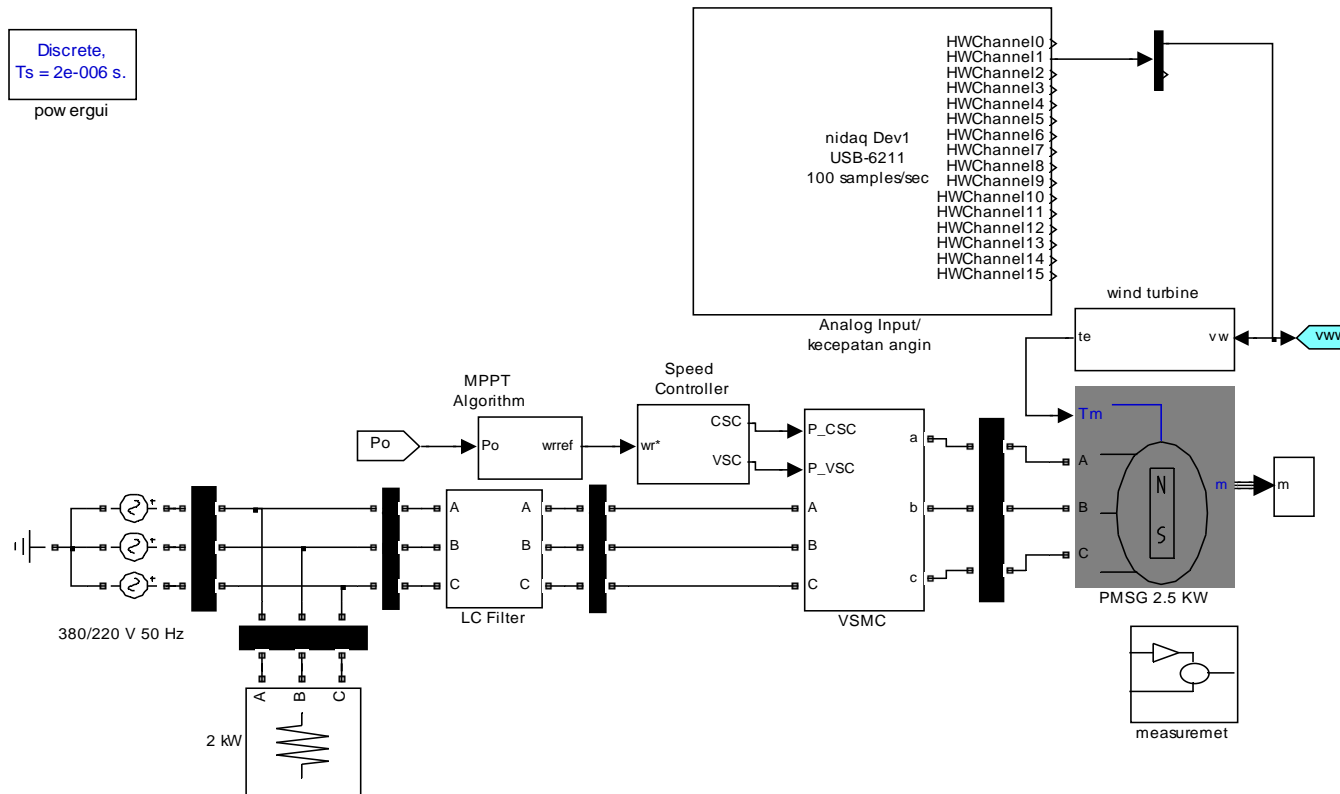
		Kelas Training																																		Total	User Accuracy %	Diag				
		-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	-0.075	-0.05	0	0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4				1.5	MC		
Kelas Referensi	-1.5	496	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	496	100.0	496		
	-1.4	32	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56	39.3	22		
	-1.3	32	4	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	36.7	22		
	-1.2	36	0	4	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	34.4	22		
	-1.1	36	0	0	4	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	34.4	22		
	-1	40	0	0	0	4	22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	32.4	22		
	-0.9	30	0	0	0	0	4	28	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	40.0	28		
	-0.8	18	0	0	0	0	0	10	28	8	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	40.0	28	
	-0.7	6	0	0	0	0	0	6	10	28	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	40.0	28	
	-0.6	0	0	0	0	0	0	3	3	10	40	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	57.1	40	
	-0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	3	19	46	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	65.7	46	
	-0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	26	22	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	35.5	22	
	-0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	6	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	55.6	30	
	-0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0.0	0	
	-0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0.0	0	
	-0.075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0.0	0	
	-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0.0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0.0	0	
	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	0.0	0	
	0.075	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	18	0.0	0
	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0.0	0
	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	42	0.0	0	
	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	54	37.0	20
	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	16	26	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	62	25.8	16
	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	40	17	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	70	57.1	40
0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	40	10	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	57.1	40	
0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	28	10	6	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	70	40.0	28		
0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	8	28	10	0	0	0	0	0	0	18	0	70	40.0	28			
0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	28	4	0	0	0	0	0	30	0	70	40.0	28			
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	22	4	0	0	0	0	40	0	68	32.4	22			
1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	22	4	0	0	0	36	0	64	34.4	22			
1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	24	4	0	36	0	64	37.5	24	
1.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	24	4	32	0	60	40.0	24		
1.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	22	32	0	56	39.3	22			
1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	496	0	496	100.0	496			
TOTAL		726	26	28	28	28	28	49	49	49	91	110	39	124	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	33	104	89	49	49	49	28	26	28	30	26	726	66	2745				
Producer Accuracy %		68.3	84.6	78.6	78.6	78.6	78.6	57.1	57.1	57.1	44.0	41.8	56.4	24.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29.9	48.5	38.5	44.9	57.1	57.1	57.1	78.6	84.6	85.7	80.0	85	68	2.4					
Overall Accuracy %		59.67%																																								
Diagonal		496	22	22	22	22	28	28	28	40	46	22	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	16	40	40	28	28	28	22	22	24	24	22	496		1638					

Lampiran 3. Performansi VSMC

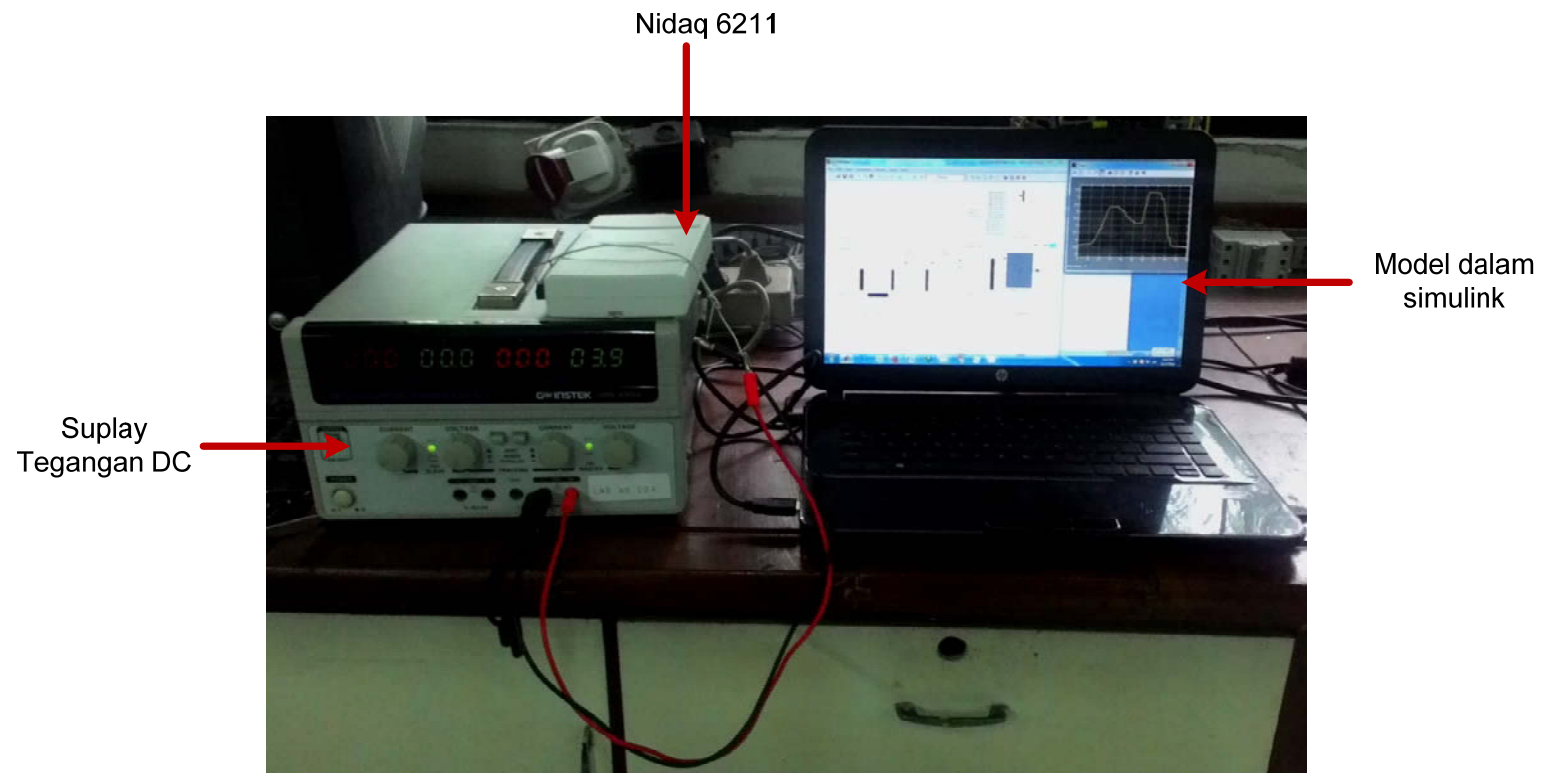


Gambar L.3 Performansi Arus VSMC.
(a) Arus grid, (b) arus VSMC, (c) arus beban

Lampiran 4. Model Pembangkit Listrik Tenaga Angin dan Instalasi Hardware NIDAQ 6211



Gambar L.4.1 Model pembangkit listrik tenaga angin untuk simulasi dengan NIDAQ 6211



Gambar L.4.2 Instalasi hardware NIDAQ USB 6211

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama : Muldi Yuhendri
Tempat, Tgl Lahir : Kampung Aur, 13 Desember 1981
Agama : Islam
Pekerjaan : Dosen Teknik Elektro Universitas Negeri Padang
Alamat Kantor : Jurusan Teknik Elektro – Fakultas Teknik
Universitas Negeri Padang
Jl. Hamka – Air Tawar Padang
Telp/Fak Kantor : 0751 53754
Alamat Rumah : Jl. Hamka No. 102 Bukittinggi
Email : muldiy@ft.unp.ac.id
muldiyuhendri@gmail.com

Pendidikan :

1. SD : SD N 07 Koto Alam, Palembang
Lulus tahun 1994
2. SMP : SLTP N 3 Palembang
Lulus tahun 1997
3. SMK : Jurusan Teknik Listrik, SMK N 1 Bukittinggi
Lulus tahun 2000
4. S1 : S1 Pendidikan Teknik Elektro – UNP Padang
Lulus tahun 2005
5. S2 : Teknik Elektro – Pascasarjana ITS Surabaya
Lulus Tahun 2009

Pengalaman Pekerjaan : Dosen Teknik Elektro, FT UNP
2006 - sekarang

Daftar Publikasi Ilmiah selama studi S3

A. Jurnal Internasional

1. A Novel Sensorless MPPT for Wind Turbine Generators Using Very Sparse Matrix Converter Based on Hybrid Intelligent Control, *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 10, No. 2, 2015, Hal. 233-243. **Index : Scopus**
2. Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control for Grid-Connected Wind Turbine Generator Using Very Sparse Matrix Converter, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 5, No. 3, 2015, Hal. 668-676. **Index : Scopus**

B. Jurnal Nasional Terakreditasi DIKTI

1. Maximum Output Power Tracking of Wind Turbine Using Intelligent Control, *TELKOMNIKA*, Vol. 9, No. 2, 2011, Hal. 217-226.
Index : Scopus

C. Seminar Internasional

1. Linear Quadratic Regulator Design For Modular Matrix Converter Using Genetic Algorithm, *Proceeding 2011 International Conference on Computer and Communication Devices*, Hal. 175-179, 1-3 April 2011, Bali – Indonesia. **Index : Scopus.**
2. Sensorless Maximum Power Point Tracking For Stand Alone Wind Generation System Based on Adaptive Neuro Fuzzy Inference System, *Proceeding 5th International Student Conference on Advance Science and Technology (ICAST) 2010*, Hal. 265-266, 15-16 December 2010, Kumamoto University – Jepang.

D. Seminar Nasional

1. Strategi Modulasi Very Sparse Matrix Converter Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Angin dengan Metode Linear Carrier SVPWM, *Seminar Nasional Otomasi Industri dan Teknologi Informasi (SNOITI)*, 21-22 Oktober 2015, Surabaya – Indonesia.

Surabaya, 26 Desember 2016

Muldi Yuhendri